



**Ricardo Jorge Peres Aguadeiro**

Licenciado em Ciências da Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

## **Desenvolvimento de um controlador para um sistema de armazenamento de energia em bobinas supercondutoras (SMES)**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Doutor João Murta Pina, FCT- UNL

Co-orientador: Doutor Nuno Amaro, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Professor Doutor Tiago Cardoso, FCT-UNL

Arguente: Professor Doutor João Martins, FCT-UNL



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Junho 2016**



# **Desenvolvimento de um controlador para um sistema de armazenamento de energia em bobinas supercondutoras (SMES)**

Copyright © Ricardo Jorge Peres Aguadeiro, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

*À minha família*



# Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus orientadores, Professor João Murta Pina e Nuno Amaro por todo o apoio e disponibilidade para me ajudarem ao longo deste trabalho, sem os seus conselhos, sugestões e ensinamentos nada disto seria possível.

Aos meus colegas do laboratório 1.8 que sempre estiveram presentes e nunca me negaram uma ajuda/opinião quando foi solicitada, foram uns verdadeiros amigos, a eles desejo muitas felicidades.

Aos meus colegas de faculdade e amigos de longa data, não nomearei cada um, mas eles sabem quem são, quero agradecer por me terem acompanhado ao longo desta jornada, foi importante saber que estavam sempre lá.

Quero também deixar um agradecimento especial a toda a minha família, começando pela minha avó, tio, bisavó, e bisavô que apesar de já ter partido tem também uma grande parte de mérito na minha formação como pessoa. Obrigado por tudo o que me ensinaram.

Por fim, pretendo deixar um agradecimento especial à minha mãe e ao meu avô, por terem investido na minha formação, quer académica quer pessoal. Pelos valores transmitidos, como a humildade e a força de vontade e pelo apoio mesmo quando as coisas pareciam impossíveis. Tudo se fez com trabalho e força de vontade e eles fizeram de mim um melhor ser humano.

A todos vós o meu muito obrigado....



# Resumo

Os sistemas de armazenamento de energia em eletromagnetos supercondutores (SMES), apresentam potenciais vantagens para os sistemas de energia.

Os problemas que afetam os sistemas de energia são vários e têm levado ao desenvolvimento de novas soluções. Nesta dissertação, realizou-se um levantamento dos problemas que afetam o funcionamento da rede elétrica e de como as características dos materiais supercondutores podem ser utilizadas para os colmatar.

Nesta dissertação efetuou-se uma simulação de todo o sistema SMES e respectivos constituintes em MatLab/Simulink, tendo em conta a ocorrência de uma interrupção total. Foi implementado o controlador para um sistema SMES através de uma placa Arduino onde foi desenvolvido um método para deteção de interrupções na rede.

Desenvolveram-se também todas as montagens que servem de suporte ao controlador, nomeadamente, as montagens *phase-shifter*, *DC offset*, *driver* IR2110 e Filtro RC.





# Abstract

The energy storage systems in superconducting electromagnets (SMES) have potential advantages for the energy systems.

The problems affecting the energy systems are various and have led to the development of new solutions, thus it was necessary to conduct a survey of the problems affecting the operation of the power grid and how the characteristics of superconducting materials can be used to tackle them.

In This dissertation was executed a simulation of all the SMES system and respective constituents in MatLab / Simulink, taking into account the occurrence of a total interruption. It was implemented the controller for a SMES system through an Arduino plate in which was developed a method to detect network interruptions.

There were also developed all assemblies which support the driver, in particular the phase-shifter assemblies, DC offset, IR2110 driver and RC filter.



# Simbologia

Símbolo	Descrição
$B$	Densidade de fluxo magnético ou indução magnética
$C$	Capacidade
$f$	Frequência
$f_{tri}$	Frequência da onda triangular
$f_{ref}$	Frequência da referência sinusoidal
$f_m$	Frequência de modulação
$H_c$	Campo magnético crítico
$H$	Campo magnético
$I_{SMES}$	Corrente elétrica na SMES
$I$	Corrente elétrica
$I_{max}$	Corrente máxima que circula na bobina
$I_{min}$	Corrente mínima que circula na bobina
$J_c$	Densidade de corrente crítica
$J$	Densidade de corrente
$L_{SMES}$	Coeficiente de auto-indução de uma bobina supercondutora integrante de um SMES
$M$	Magnetização
$m$	Índice de modulação de um controlador de modulação por largura de impulso.
$t$	Tempo
$T_c$	Temperatura crítica
$T$	Período
$U_{tri}$	Tensão da onda triangular sinusoidal
$U_{ref}$	Tensão da referência sinusoidal
$U_{abc}$	Tensões geradas na fonte
$U_{a\_ref}$	Tensão de referência

$U_{dq0}$	Componentes direta, quadratura e zero
$U_d$	Componente direta
$U_q$	Componente quadratura
$U_{DC}$	Tensão no barramento DC
$U_{carga}$	Tensão na carga
$U_{arduino}$	Tensão de entrada no Arduino
$U_{DC\_offset}$	Tensão de saída da montagem DC <i>offset</i>
$U_{in}$	Tensão de entrada no primeiro bloco do Phase-Shifter
$U_{in+120}$	Tensão de saída no primeiro bloco do Phase-Shifter
$U_{in+240}$	Tensão de saída no segundo bloco do Phase-Shifter
$W_{mag}$	Energia armazenada no campo magnético de uma bobina supercondutora
$\tau$	Constante de tempo
$\phi$	Desfasamento

# Notações

AC	Alternating current ou corrente alternada
ADC	Analog to Digital Converter
CSC	Current source converter, ou conversor fonte de corrente
DC	Direct current ou corrente contínua
HTS	High Temperature Superconductor
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor
LTS	Low Temperature Superconductor
PWM	Pulse Width Modulation, ou modelação por largura de impulsos
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage
SPWM	Sinusoidal Pulse Width Modulation
VSC	Voltage source converter, ou conversor fonte de tensão



# Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Motivação.....	1
1.2	Objetivos da dissertação.....	1
1.3	Estrutura do documento .....	2
2	Revisão bibliográfica.....	3
2.1	Supercondutividade .....	3
2.1.1	Propriedades de materiais supercondutores.....	4
2.1.2	Tipos de materiais supercondutores .....	6
2.2	Sistemas SMES.....	7
2.2.1	Constituição de um sistema SMES: .....	9
2.2.2	Sistema de Controlo .....	14
2.2.3	Aplicações e projetos de SMES .....	15
2.2.4	Estratégias de Controlo .....	17
2.3	Síntese do Capítulo .....	20
3	Simulação do sistema SMES.....	21
3.1	Interrupção .....	21
3.2	Modelo Simulink/MatLab do sistema SMES.....	22
3.2.1	Funcionamento do Sistema .....	23
3.2.2	Simulação do sistema SMES sem filtro .....	31
3.2.3	Simulação do sistema SMES com filtro .....	33
3.3	Síntese do Capítulo .....	35
4	Controlador do sistema SMES.....	37
4.1	Fonte .....	38
4.2	Phase-Shifter .....	39
	Dimensionamento.....	39
	Implementação.....	41
4.3	DC <i>Offset</i> .....	42
	Dimensionamento.....	42
	Implementação.....	43
4.4	Microcontrolador - Arduino.....	44
4.5	Driver IR2110 .....	46
4.6	Filtro .....	49



4.7	Síntese do Capítulo .....	51
5	Conclusões e trabalho futuro .....	53
	Bibliografia .....	55

# Índice de Figuras

Figura 2.1- Evolução prevista da resistência para temperaturas próximas de zero absoluto de acordo com as teorias existentes no séc.XX. Adaptado de (Blundell, 2009).....	3
Figura 2.2 – Ensaio efetuado por Onnes comprovando que a 4.2 K o mercúrio entra no estado supercondutor (Onnes, 1913) .....	4
Figura 2.3 - Diagrama T-J-H- Retirado de (Pina, 2010).....	5
Figura 2.4 Magnetização de um supercondutor do tipo I em função do campo aplicado. Retirado de (Pina, 2010).....	6
Figura 2.5 Magnetização de um supercondutor do tipo II em função do campo aplicado. Retirado de (Pina, 2010).....	7
Figura 2.6 - Comparação entre topologias de armazenamento de energia face ao tempo de descarga. Retirado de (UNICAMP, 2005) .....	8
Figura 2.7 - Configuração SMES. Retirado de (Pina, 2010) .....	9
Figura 2.8 - Diferentes topologias de SMES. Solenoidal à esquerda e toroidal à direita. (Xiao. L, 2008) (Kim, 2005) .....	10
Figura 2.9 - Conversor fonte tensão (verde) com <i>chopper</i> (azul) .....	11
Figura 2.10 - Conversor Fonte tensão (VSC) .....	12
Figura 2.11 - Modo Retificação.....	12
Figura 2.12 - Modo Inversão .....	13
Figura 2.13 - Conversor <i>chopper</i> (DC/DC) .....	13
Figura 2.14 - Modos de operação da SMES: a) Carregar, b) Descarregar, c) Persistente.....	14
Figura 2.15 - Conversor meia ponte.....	17
Figura 2.16 - Geração de sinal PWM para conversor meia ponte (a azul a onda referência e a vermelho triangular) e tensão de saída <b>VA</b> .....	18
Figura 2.17 - Conversor ponte completa.....	19
Figura 2.18 – Geração de PWM para conversor ponte completa (a azul a onda referência, a verde a onda de referência inversa e a vermelho triangular) e tensão de saída <b>VAB</b> .....	19
Figura 3.1 Interrupção completa.....	21
Figura 3.2 - Modelo do sistema SMES.....	22
Figura 3.3 – Circuito de transferência de energia até á carga sem ocorrência de falha .....	23
Figura 3.4 - Forma de onda na fonte e carga .....	24
Figura 3.5 Corrente na SMES sem falha.....	24
Figura 3.6 Circuito de transferência de energia entre a SMES e a carga quando ocorre uma falha .....	25
Figura 3.7 – Tensão na fonte e tensão na carga na presença de falha.....	25
Figura 3.8 - Condicionador de Sinal .....	26
Figura 3.9 - Detetor de falha.....	27
Figura 3.10 – Tensão na fonte <b>U<sub>fonte</sub></b> , <b>U<sub>dq0</sub></b> , falha.....	28
Figura 3.11 - Conversor <i>chopper</i> com SMES.....	28
Figura 3.12 - Controlador <i>chopper</i> (DC/DC).....	29
Figura 3.13 - Gerador de PWM.....	30
Figura 3.14 - Sinais de falha , <b>U<sub>a_ref</sub></b> e PWM.....	31
Figura 3.15 - Simulação do sistema SMES sem filtro .....	32
Figura 3.16 - Filtro RLC .....	33
Figura 3.17 - Simulação do sistema SMES com filtro.....	34

Figura 4.1 – Montagem experimental do controlador .....	37
Figura 4.2- Sequência de blocos do sistema .....	38
Figura 4.3 Onda gerada pela fonte .....	38
Figura 4.4 - Phase-Shifter .....	39
Figura 4.5 - Primeiro andar do Phase-Shifter .....	40
Figura 4.6 Segundo andar - Phase-Shifter .....	40
Figura 4.7 Onda de entrada $U_{in}$ (a verde), e de saída $U_{in+120}$ (a vermelho) e $U_{in+240}$ (a azul) .....	41
Figura 4.8 Phase-Shifter .....	41
Figura 4.9 Desfasamento entre as três tensões geradas .....	42
Figura 4.10 Montagem DC Offset .....	42
Figura 4.11- Implementação da montagem DC offset .....	43
Figura 4.12- Offset adicionado pela montagem .....	43
Figura 4.13 - Arduino UNO .....	44
Figura 4.14 – IR2110 .....	46
Figura 4.15 - Montagem IR2110 para controlar um conversor meia ponte .....	46
Figura 4.16 - Onda de saída do conversor meia ponte .....	47
Figura 4.17 Montagem IR2110 para controlar um conversor ponte completa .....	47
Figura 4.18 - Onda de saída do conversor ponte completa .....	48
Figura 4.19 – Módulo de IGBT's .....	48
Figura 4.20 - Filtro RC .....	49
Figura 4.21 - Comparativo entre sinal de entrada ( $U_{in}$ ) sem filtro e de saída ( $U_{out}$ ) com o filtro RC .....	50
Figura 4.22- Comparativo entre as simulações efetuadas em MatLab/Simulink e os resultados experimentais .....	50

# Índice de Tabelas

Tabela 1 - Classificação das SMES. Adaptado de (Weinstock, 1997).....	15
Tabela 2 – Projetos de SMES na Europa. Adaptado de (Mikkonen, 2002).....	16



# **1 Introdução**

## **1.1 Motivação**

No início do novo milénio com a introdução em massa dos dispositivos eletrónicos no quotidiano das populações, passou a existir um cuidado especial no fornecimento de energia aos mesmos.

As cavas de tensão e interrupções são alguns dos problemas que afetam a qualidade de energia. Uma interrupção na alimentação e consequente destruição de alguns componentes acarreta enormes problemas económicos pois poderá significar uma paragem de produção em determinadas indústrias. Posto isto, surge a necessidade de desenvolver estratégias de deteção de falhas e de tecnologias capazes de precaver este tipo de situações.

De uma vasta lista de opções de tecnologias de armazenamento, surgem os sistemas de armazenamento em eletromagnetos supercondutores (SMES - Superconducting Magnetic Energy Storage). Estes sistemas tem com enorme potencial de aplicabilidade na resolução de alguns problemas de qualidade de energia, por conseguirem debitar com enorme rapidez enormes quantidades de potência mostrando-se eficazes na resolução de interrupções.

## **1.2 Objetivos da dissertação**

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver um controlador para um sistema de armazenamento de energia em bobinas supercondutoras.

Com esta dissertação pretende-se desenvolver uma ferramenta de controlo para ser utilizada em casos onde exista uma interrupção total no fornecimento de energia. Para isso irá ensaiar-se um sistema de controlo em MATLAB/Simulink que permita em caso de falha colmatar a mesma. Posteriormente será implementada essa mesma unidade de controlo ensaiada em MatLab/Simulink através de um microcontrolador.

### **1.3 Estrutura do documento**

Esta dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos, são eles:

Capítulo 1- Introdução: Neste capítulo são mencionadas as motivações e os objetivos que esta dissertação se propõe.

Capítulo 2 - Revisão bibliográfica: Neste capítulo será efetuado o levantamento bibliográfico de todas as matérias que servem de base para o trabalho realizado. Foram abordados temas como: a descoberta da supercondutividade e as grandezas que a caracterizam, os tipos de materiais supercondutores, o funcionamento dos sistemas SMES, bem como todos os conversores que o constituem, as aplicações dos sistemas SMES e respectivas estratégias de controlo.

Capítulo 3 – Simulação do sistema SMES: Neste capítulo é apresentado o problema a que esta dissertação se propõe resolver. São detalhados todos os blocos envolvidos no sistema SMES, como os resultados das simulações efetuadas em Simulink/MatLab.

Capítulo 4 - Implementação do controlador do sistema SMES: Neste capítulo são detalhados todos os componentes utilizados na implementação do controlador, bem com uma análise dos resultados.

Capítulo 5 – Conclusões e Trabalho Futuro: Neste capítulo apresentam-se algumas conclusões acerca do trabalho desenvolvido, assim como uma perspetiva para trabalho futuro.

## 2 Revisão bibliográfica

Neste capítulo efetua-se uma introdução à descoberta da supercondutividade, e as propriedades que a caracterizam, assim como os diferentes tipos de materiais supercondutores. Na segunda parte deste capítulo são detalhados os constituintes dos sistemas SMES, assim como as suas aplicações e modos de operação, finalizando-se com as estratégias de controlo imprescindíveis ao seu funcionamento.

### 2.1 Supercondutividade

Em 1911 no laboratório na Universidade de Leiden, Kamerlingh-Onnes ao estudar as propriedades das substâncias a temperaturas muito baixas, verifica que a resistência elétrica de tubos capilares de mercúrio diminuía de forma abrupta aquando colocados abaixo de 4,2 K.

Essa descoberta só foi possível após alcançar com sucesso a liquidação de Hélio, a 4,2K, essa descoberta permitiu diminuir bastante as temperaturas utilizadas no estudo de materiais (Seidel, 2015) (Delft & Kes, 2010).

Até então sabia-se apenas que a resistência dos metais diminuía com a temperatura mas não existia nenhuma teoria comprovada. Na Figura 2.1 estão ilustradas as evoluções previstas da resistência para temperaturas próximas do zero absoluto, de acordo com as principais teorias existentes na época.

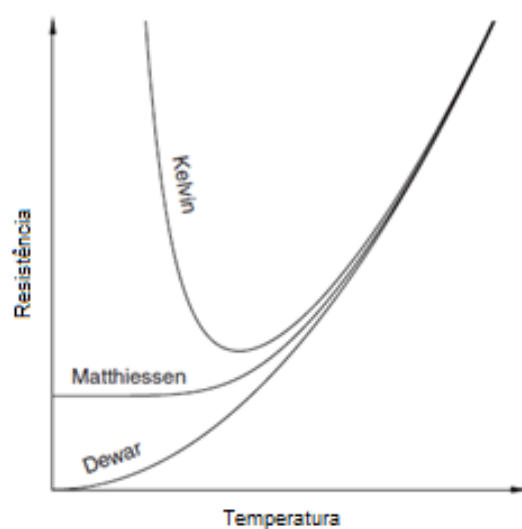
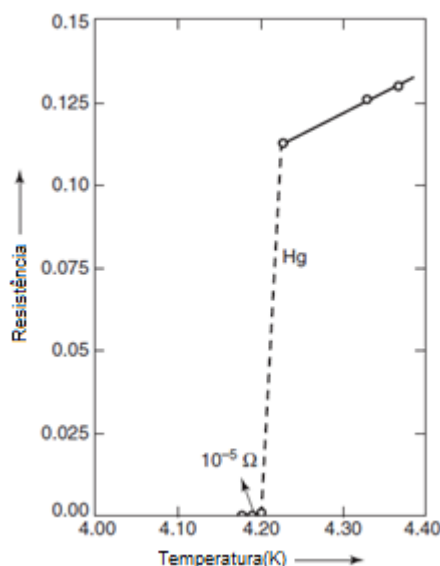


Figura 2.1- Evolução prevista da resistência para temperaturas próximas de zero absoluto de acordo com as teorias existentes no séc.XX. Adaptado de (Blundell, 2009).



Na Figura 2.2 observa-se que a resistividade do mercúrio quando arrefecido a 4,2 K. A essa temperatura a resistividade tem uma queda abrupta, e atinge um valor muito próximo de zero, esse fenómeno ficou conhecido como supercondutividade. Em suma, um material passa ao estado supercondutor quando atinge um valor de temperatura inferior à sua temperatura critica  $T_c$ , no entanto esse valor não é constante, pois varia consoante o tipo de material utilizado.



**Figura 2.2 – Ensaio efetuado por Onnes comprovando que a 4.2 K o mercúrio entra no estado supercondutor (Onnes, 1913)**

### 2.1.1 Propriedades de materiais supercondutores

No subcapítulo anterior, verificou-se que o avanço da tecnologia de criogenia, foi um aspeto extremamente importante para a descoberta da supercondutividade. Por conseguinte neste capítulo irão ser abordadas as propriedades e grandezas que fazem com que um material se possa denominar de supercondutor.

#### Grandezas

A supercondutividade é caracterizada por três grandezas físicas que a condicionam nomeadamente:

- Temperatura critica  $T_c$ .
- Campo magnético (ou densidade de fluxo) critica  $H_c$ .
- Densidade de corrente crítica  $J_c$ .

A relação que se estabelece entre estas grandezas designa-se por diagrama  $T - J - H$  e representa os limites da supercondutividade. Na Figura 2.3 ilustra-se um diagrama qualitativo genérico  $T - J - H$  de um supercondutor.

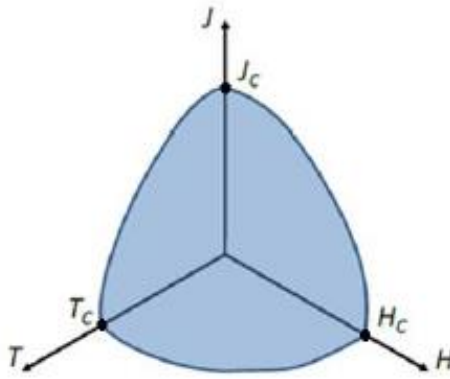


Figura 2.3 - Diagrama T-J-H- Retirado de (Pina, 2010).

Através da análise das três grandezas ilustrada na Figura 2.3 conclui-se que caso alguma destas grandezas assumir um valor que a coloque fora da região ilustrada a azul conhecida como região de supercondutividade, o material sairá do estado supercondutor, isto é somente no interior dessa zona o material se encontra no estado supercondutor.

### **Resistividade Nula**

Abaixo de uma determinada temperatura crítica alguns materiais apresentam uma resistência nula. Essa propriedade pode ser comprovada fazendo um ensaio que consiste em induzir uma corrente num anel supercondutor perfeito e verificar a densidade de fluxo causada por correntes persistentes, estas correntes não sofrem decréscimos significativos ao longo de um longo intervalo de tempo porque a resistividade do material é nula (Pina, 2010).

Sendo  $\tau$  a constante de tempo do anel supercondutor,  $R$  a resistência,  $L$  a indutância e  $I_0$  a corrente imposta no anel, a equação (1) descreve a queda de corrente face ao tempo no anel (Werner Buckel, 2004) :

$$I(t) = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \tau = \frac{L}{R} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow I(t) = I_0 e^{-\frac{R}{L}t} \quad (1)$$

No caso do anel se encontrar no estado supercondutor tem-se que,  $R = 0$  substituindo em (1) significa que  $I(t) = I_0$ . Ou seja, a corrente mantém-se constante. Esta característica veio possibilitar o início do desenvolvimento de sistemas de armazenamento de energia em eletromagnetos supercondutores.

## **Efeito Meissner**

Em 1933 Meissner e Ochsenfeld descobriram que um determinado material no estado supercondutor comporta-se como um diamagneto perfeito, isto é, o material supercondutor expulsa do seu interior o fluxo magnético. Este fenómeno ficou conhecido como efeito Meissner (Seidel, 2015).

Sendo  $B$  a densidade de fluxo,  $H$  o campo magnético e  $M$  a magnetização, a densidade de fluxo no interior de um supercondutor é descrita pela equação (2):

$$B = \mu_0(H + M) \quad (2)$$

Sabe-se que na presença de um diamagneto perfeito  $M = -H$ , logo substituindo em (2) obtém-se  $B = 0$ , verificando-se assim que não existe densidade de fluxo no interior do material supercondutor (Osterman, 2006).

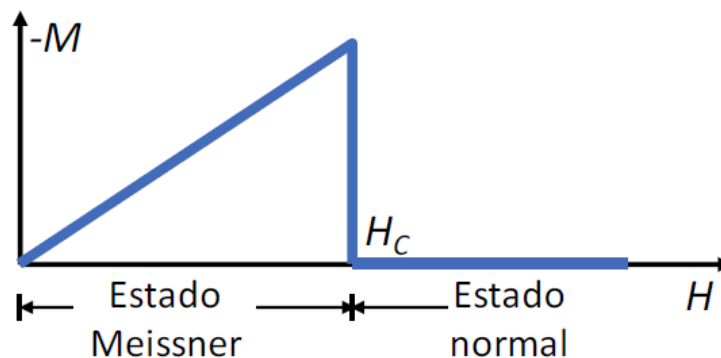
### **2.1.2 Tipos de materiais supercondutores**

Existem dois tipos de supercondutores, os do tipo I e tipo II. As suas diferenças devem-se fundamentalmente às suas propriedades eletromagnéticas.

#### **Tipo I:**

Os supercondutores do tipo I foram os primeiros materiais supercondutores a serem descobertos, estes supercondutores apresentam temperaturas críticas  $T_c$  muito baixas e podem funcionar como um diamagneto perfeito, não permitindo a penetração de campos magnéticos externos (Osterman, 2006).

Como apresentado na Figura 2.4 os supercondutores do tipo I apresentam uma transição brusca entre o estado normal e o estado Meissner.



**Figura 2.4 Magnetização de um supercondutor do tipo I em função do campo aplicado. Retirado de (Pina, 2010).**

### Tipo II:

Os supercondutores do tipo II, possuem algumas diferenças em relação aos supercondutores do tipo I, para além de normalmente apresentarem temperaturas críticas  $T_c$  mais elevadas, têm um comportamento diferente aquando da transição para o estado supercondutor. Se por um lado os supercondutores do tipo I apresentavam uma mudança brusca entre o estado normal e o estado supercondutor, os supercondutores do tipo II apresentam um estado misto compreendido entre o estado normal e supercondutor, como ilustrado na Figura 2.5.

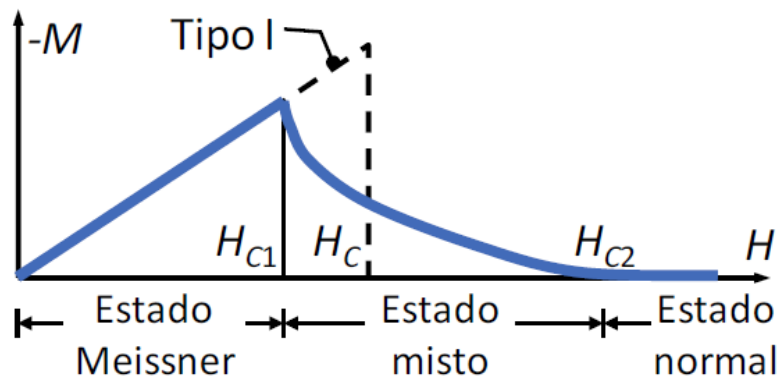


Figura 2.5 Magnetização de um supercondutor do tipo II em função do campo aplicado. Retirado de (Pina, 2010)

O estado misto, caracteriza-se por um estado onde o material permite a penetração de campos magnéticos externos começando a existir regiões em que o material está no estado normal e outras no estado supercondutor (Osterman, 2006).

## **2.2 Sistemas SMES**

Este tipo de sistema surge nos anos 70, e foi pensada inicialmente para funcionar como uma espécie de bateria que armazenava energia durante a noite e aplicaria essa mesma energia na estabilização de picos de consumo durante o dia.

Contudo, para armazenar uma quantidade de energia significativa seria necessário desenvolver um projeto de grande escala que requeria a construção de dispositivos SMES de grandes dimensões com custos elevadíssimos, tornando assim o projeto inviável.

Para além das estruturas que seriam construídas para albergar tais sistemas, seriam também necessárias enormes quantidades de material supercondutor para construção das bobinas e respetivo sistema de arrefecimento por criogenia (Hassenzahl, 1989).

O sistema SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage), consiste numa bobina no estado supercondutor que armazena energia no seu campo magnético quando percorrida por uma corrente contínua.

Essa energia armazenada na bobina supercondutora  $W_{mag}$  é dada pela equação (3) :

$$W_{mag} = \frac{1}{2}LI^2 \quad (3)$$

Onde  $L$  corresponde à indutância da bobina, e  $I$  à corrente que percorre a mesma.

Na Figura 2.6 está um gráfico comparativo entre o SMES e os sistemas já existentes, tendo em conta o tempo de descarga e a potência de cada um deles. Como se pode observar existem vários tipos de sistemas de armazenamento de energia, como super condensadores, compressores e baterias no entanto nenhum destes sistemas consegue disponibilizar potência com enorme rapidez como as SMES. Dependendo das suas características este sistema pode debitar na ordem dos megawatt ao longo de milissegundos (Amaro, Casimiro, Pina, Martins, & Ceballos, 2015) (L. Chen, 2006)

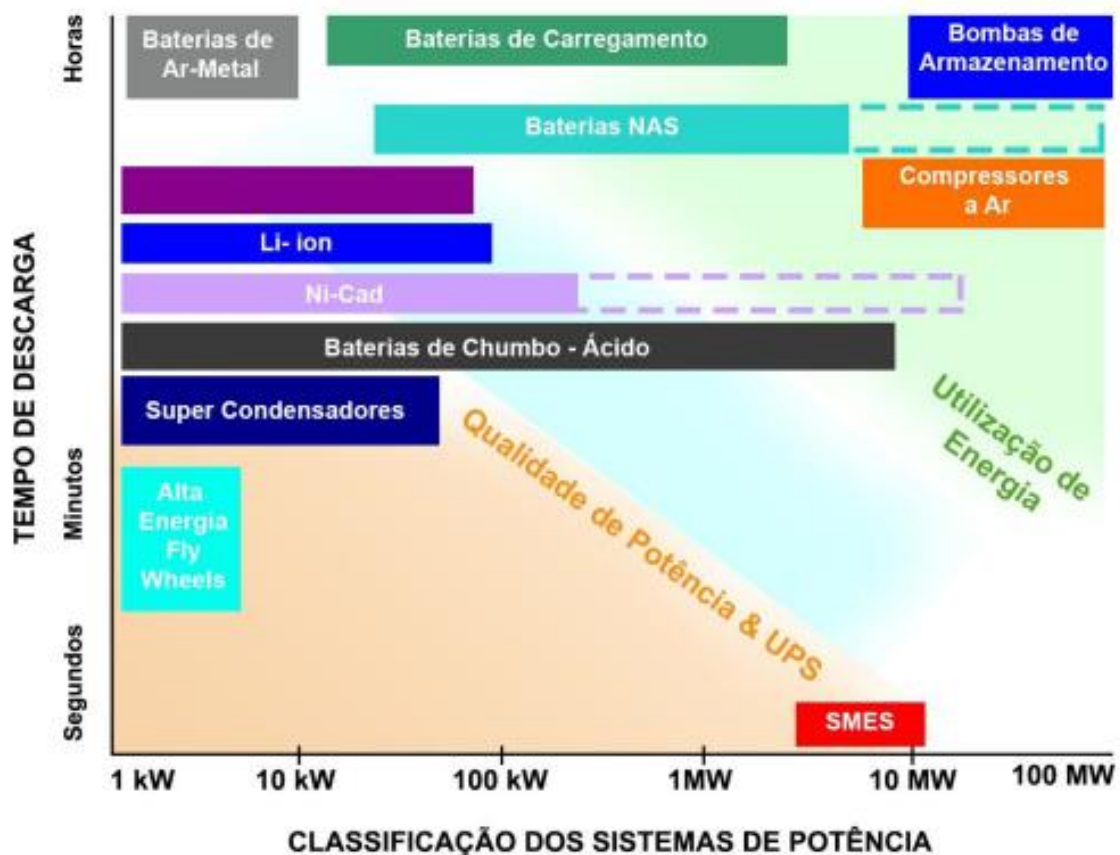


Figura 2.6 - Comparação entre topologias de armazenamento de energia face ao tempo de descarga.  
Retirado de (UNICAMP, 2005)

### 2.2.1 Constituição de um sistema SMES:

Um sistema SMES é composto por três subsistemas, são eles (Xue, 2006):

- Bobina supercondutora e respetivo sistema de criogenia
- Sistema de condicionamento de potência
- Sistema de controlo

Na Figura 2.7 está ilustrada a típica configuração deste sistema.

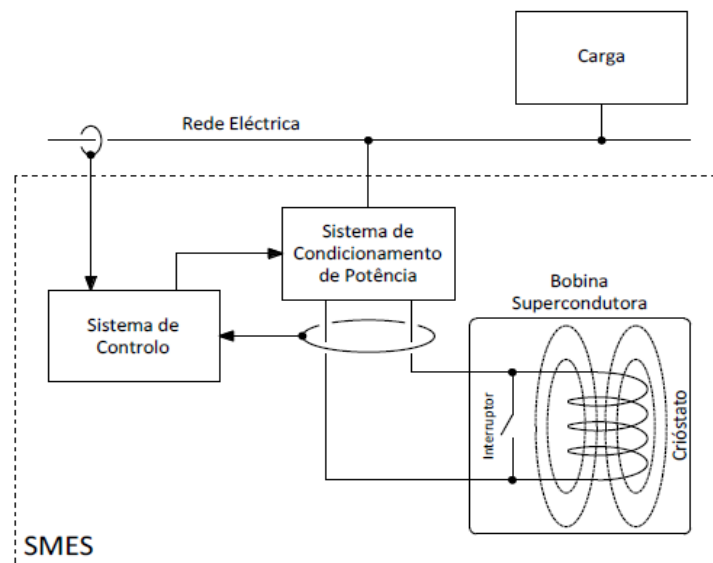
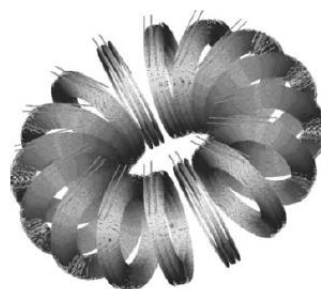


Figura 2.7 - Configuração SMES. Retirado de (Pina, 2010)

#### 2.2.1.1 Bobina Supercondutora

A bobina supercondutora é o elemento chave neste sistema pois é neste componente que é armazenada toda a energia. De modo a que isso aconteça o sistema de criogenia terá de manter a temperatura da bobina abaixo da temperatura crítica  $T_c$  do material que constitui a bobina para que este se encontre sempre no estado supercondutor.

Existem dois tipos de topologia extremamente utilizados na construção dos sistemas SMES, a topologia solenoidal e toroidal como ilustra a Figura 2.8.



**Figura 2.8 - Diferentes topologias de SMES. Solenoidal à esquerda e toroidal à direita. (Xiao, L, 2008) (Kim, 2005)**

Ambas as topologias comportam várias vantagens, se por um lado a configuração solenoidal permite armazenar uma maior quantidade de energia e ter uma estrutura relativamente mais simples, a topologia toroidal apresenta uma menor dispersão de campo magnético e possui unidades com menor dimensão (Tixador, 2008).

### **2.2.1.2 Sistema de condicionamento de potência**

Este subsistema é responsável pelo interface entre a bobina e a rede, este conversor pode ser implementado utilizando dois conversores distintos:

- Conversor fonte de corrente (CSV)
- Conversor fonte de tensão (VSC) com *chopper*

Através das conversões realizadas pelo conversor a energia em corrente alternada é convertida em energia em corrente contínua para ser armazenada na bobina supercondutora e vice-versa. Deste modo é necessário aplicar um conversor AC/DC bidirecional.

Pelo facto de ter sido o conversor fonte de tensão (VSC) com *chopper* o escolhido para o desenvolvimento desta dissertação, é sobre o mesmo que recai o foco neste subcapítulo, podendo os detalhes referentes ao CSV ser consultados em (Pina, 2010) (Iglesias, 1995).

#### **Conversor fonte de tensão (VSC) com *chopper***

Este conversor é constituído por dois blocos mencionados em baixo. Ambos formam um conversor fonte de tensão (VSC) com *chopper* (Iglesias, 1995).

- Conversor fonte de tensão (VSC)
- Conversor *chopper* (DC/DC)

Na Figura 2.9 está representada a topologia de um conversor fonte tensão (VSC) com *chopper*.

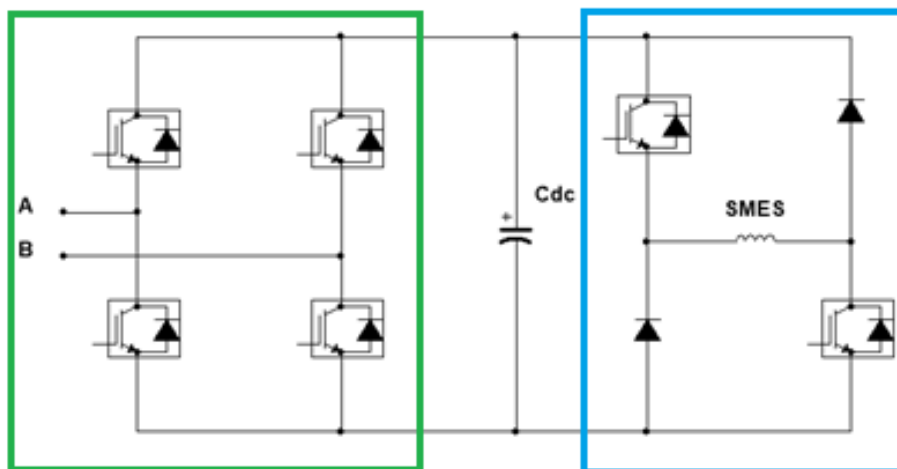


Figura 2.9 - Conversor fonte tensão (verde) com *chopper* (azul)

Para efetuar as conversões utilizou-se como já foi mencionado um conversor fonte de tensão com *chopper* que de acordo com potência a utilizar pode ser constituído por:

- MOSFET
- IGBT
- GTO

A escolha do semicondutor a utilizar na estrutura do conversor depende da potência a que o sistema irá operar. MOSFETs são utilizados para baixa potência na ordem dos kVA, IGBTs são utilizados para média potência na ordem das centenas de kVA e GTOs são utilizados para alta potência na ordem dos MVA (Palma, 1999).

Na topologia representada na Figura 2.9 utilizam-se semicondutores IGBT, com díodos em roda livre para garantir a circulação de energia. A colocação de um condensador  $C_{dc}$  em paralelo com ambos os conversores permite alisar a tensão à saída do conversor melhorando assim conversão em ambos os sentidos quer, na retificação (AC/DC), quer na inversão (DC/AC).

### **Conversor fonte de tensão (VSC)**

Na Figura 2.10 está ilustrado o conversor fonte de tensão (VSC), que também pode ser designado de conversor AC/DC bidirecional.



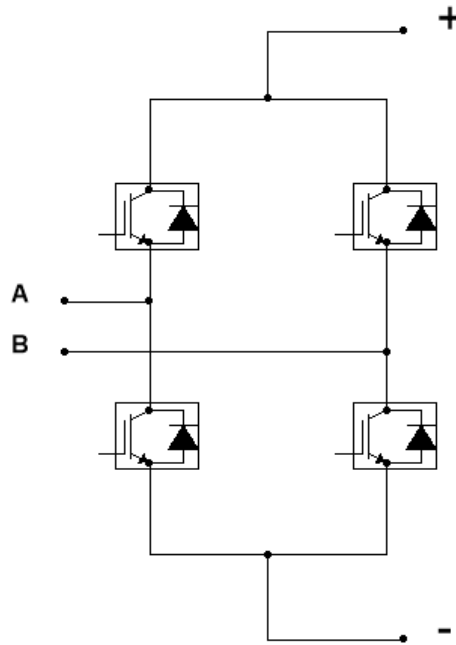


Figura 2.10 - Conversor Fonte tensão (VSC)

Este conversor pode funcionar em ambos os sentidos, tendo dois modos distintos de operação, são eles:

- Retificador - Neste modo de operação o conversor é responsável por fazer a conversão entre o lado AC na rede e o lado DC onde se encontra a bobina, como ilustra a Figura 2.11.

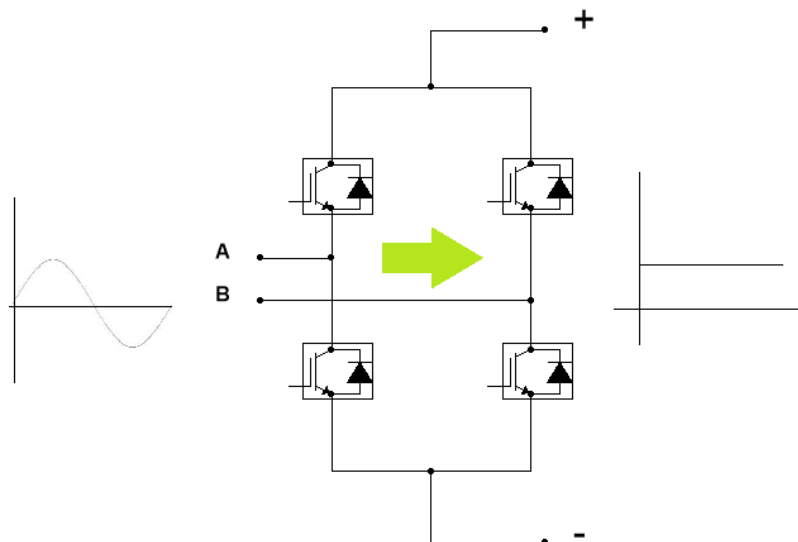


Figura 2.11 - Modo Retificação

- **Inversor** - Neste modo de operação o conversor é responsável por fazer a conversão entre o lado DC onde se encontra a bobina e o lado AC na rede, como ilustra a Figura 2.12. Contudo existe uma particularidade neste modo de funcionamento nomeadamente a necessidade de utilização de estratégias de modulação PWM para comutar os semicondutores.

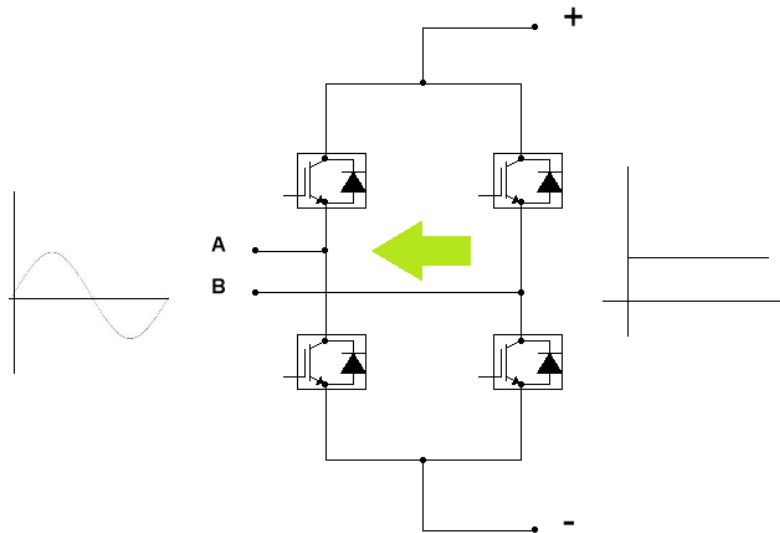


Figura 2.12 - Modo Inversão

### **Conversor *chopper* (DC/DC)**

Este conversor é o dispositivo responsável pelo correto funcionamento da SMES. Através do controlo dos semicondutores, garante-se o modo de funcionamento em que a SMES se encontra (Amaro, Casimiro, Pina, Martins, & Ceballos, Combined Operation of an Unified Power Quality, 2015). Na Figura 2.13 está ilustrada a topologia do conversor *chopper* (DC/DC).

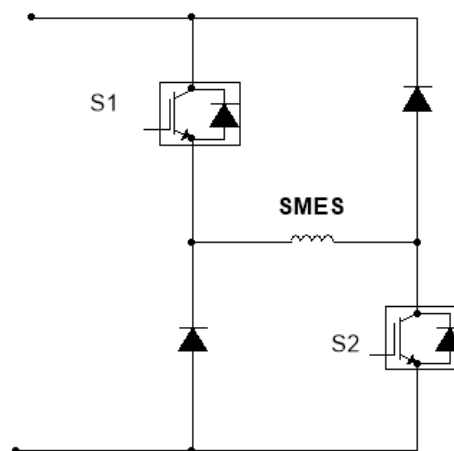


Figura 2.13 - Conversor *chopper* (DC/DC)

Na Figura 2.14 estão ilustrados os três diferentes modos de funcionamento da SMES (Skiles, 1996), são eles:

- Carregar

Ocorre quando os IGBTs, S1 e S2 estão fechados, carregando a bobina até ao valor máximo definido  $I_{max}$ .

- Descarregar

Ocorre quando os IGBTs, S1 e S2 estão abertos, fazendo com que a corrente armazenada na bobina seja descarregada. Este modo só está ativo quando ocorre uma falha.

- Persistente

Ocorre quando a bobina atinge o valor máximo de corrente  $I_{max}$  e não consegue armazenar mais energia, assim há necessidade de manter a corrente no interior do conversor *chopper*, para que tal aconteça mantém-se o IGBT S1 em aberto e fecha-se o S2, no entanto com o decorrer do tempo algumas perdas resistivas vão acontecendo porém caso a corrente na bobina atinja o valor mínimo definido  $I_{min}$ , volta a carregar.

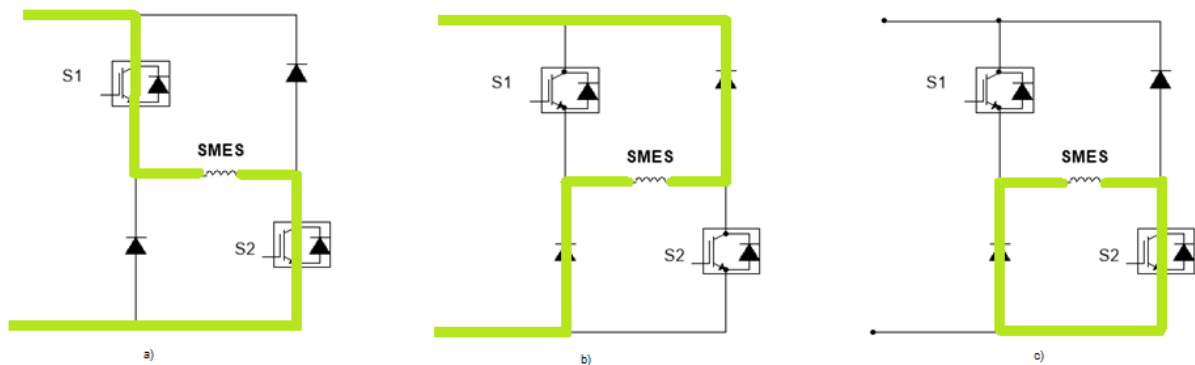


Figura 2.14 - Modos de operação da SMES: a) Carregar, b) Descarregar, c) Persistente

## 2.2.2 Sistema de Controlo

Este subsistema funciona como central de comando de todo o sistema SMES. Através do sistema de controlo são efetuadas várias tarefas imprescindíveis, tais como:

- Gestão de todo o fluxo de energia no sistema, ou seja alternar os modos de carga e descarga e persistente da bobina.
- Detecção da cava de tensão.

- Manutenção do valor de corrente na bobina.
- Controlo do sistema de criogenia, para que a bobina não atinja uma temperatura superior a temperatura crítica  $T_c$  do material que a constitui.
- Controlo dos conversores de potência, através de estratégias de PWM.

Relativamente ao último ponto, o controlo dos conversores e respetivas estratégias de PWM serão abordadas com maior detalhe posteriormente.

### 2.2.3 Aplicações e projetos de SMES

Os sistemas SMES tem uma capacidade de resposta extremamente rápida o que permite debitar enormes quantidades de energia em um curto espaço de tempo, no entanto baseiam a sua classificação segundo a sua capacidade de armazenamento (Weinstock, 1997) como ilustra a Tabela 1.

Classificação	Capacidade de Armazenamento ( MJ )
SMES -Larga escala	$>10^5$
SMES-Média escala	$10^3-10^5$
Mini-SMES	$10^2-10^3$
Micro-SMES	$< 10^2$

**Tabela 1 - Classificação das SMES. Adaptado de (Weinstock, 1997)**

A implementação da tecnologia SMES oferece inúmeras vantagens e uma vasta lista de aplicações, muitas delas podem ser consultadas em (Molina, 2011) (Amaro, Casimiro, Pina, Martins, & Ceballos, 2012). Contudo de seguida enumera-se um resumo de algumas das aplicações:

- Qualidade de energia: Os SMES podem armazenar energia com grande eficiência, (Ali, 2010) podendo disponibilizar essa mesma energia muito rapidamente, para colmatar os efeitos de interrupções rápidas. (Molina, 2011) (Amaro, Casimiro, Pina, Martins, & Ceballos, 2012)
- Backup Power Supply: Este sistema de armazenamento pode ser utilizado durante alguns segundos permitindo que o sistema de alimentação de reserva arranque em caso de interrupção (Xue, 2006) (Amaro, Casimiro, Pina, Martins, & Ceballos, 2012)
- Estabilização do sistema: Os SMES têm a capacidade de absorver oscilações de baixa frequência, causadas por fenómenos transitórios com o intuito de estabilizar a frequência da rede (Molina, 2011).

Anteriormente à descoberta dos HTS, os SMES desenvolvidos focavam-se em condutores LTS. Contudo estes condutores teriam uma grande desvantagem pois devido ao seu processo de arrefecimento demorar um longo período de tempo dificultava a sua operação (Yuan, 2011). Desde a descoberta dos HTS em meados dos anos 80 têm sido propostos quase todos os tipos de HTS SMES pois o custo de arrefecimento criogénico é bastante reduzido por estes condutores apresentarem temperaturas críticas mais elevadas em relação aos LTS.

Existem projetos de SMES um pouco por todo o mundo, em 2001 foi desenvolvido um projeto coreano liderado pelo Korean Electrotechnology Research Institute (KERI) para um dispositivo HTS SMES de 200 kJ, utilizando uma topologia toroidal, montada num crióstato, utilizando o azoto líquido para a sua refrigeração, com uma corrente de 200 A, e tensão de 1000 V (Seong, et al., 2002).

Em 2005 a Universidade de Wollongong desenvolveu um projeto para uma SMES 20 kJ com capacidade para compensar quedas de tensão. Na construção da sua bobina foi utilizado uma fita BSCCO-2223, tendo em conta que o dispositivo iria operar a uma temperatura de 25 K (Hawley & Gower, 2005).

Já em 2007, são publicados os resultados de um projeto japonês que desenvolveu uma HTS SMES com o objetivo obter alta densidade de energia através de um sistema de bobina híbrido (HTS-LTS). A bobina HTS utilizada era composta por 16 enrolamentos em formato dupla panqueca e foi testado a uma temperatura de 4.2 K, com um campo magnético máximo de 8,9 T em HTS e 3,5 T no LTS. Esta unidade pode armazenar até 6,5 MJ de energia (Tosaka, et al., 2007).

Muito outros projetos de SMES foram e têm sido desenvolvidos, na tabela 2 estão apresentados alguns dos projetos desenvolvidos a nível europeu desde início do novo milénio.

Pais	Organização	Tipo	Especificações
Finlândia	Universidade Tampere	HTS $\mu$ SMES	160 A / 200 V, 5 kJ
Finlândia	Universidade Tampere	LTS $\mu$ SMES	275 A / 200V, 0,2 kJ
Alemanha	EUS GmbH	HTS $\mu$ SMES	100 A / 200 V, 8 kJ
Alemanha	ACCEL	HTS $\mu$ SMES	80 A / 400 V, 150 kJ
Alemanha	ACCEL	LTS $\mu$ SMES	1 kA / 400 V, 2 MJ
Alemanha	FZH Research Center	LTS $\mu$ SMES	2,5 kA / 6 kV, 0,22 MJ
Alemanha	FZH Reaserch Center	LTS $\mu$ SMES	300 A / 700 V, 0,25 MJ
Alemanha	TU Munich	LTS $\mu$ SMES	1380 A / 3 kV, 1MJ
Itália	CESI	LTS $\mu$ SMES	1 MVA, 4 MJ
Espanha	ASINEL	LTS $\mu$ SMES	1 kA / 500 V, 1 MJ

**Tabela 2 – Projetos de SMES na Europa. Adaptado de (Mikkonen, 2002)**

### 2.2.4 Estratégias de Controle

Para um correto funcionamento dos conversores envolvidos neste sistema, é necessário criar sinais de comando para controlar o modo de operação desses mesmos conversores. Surge então a necessidade de aplicar estratégias de modelação que dependendo do tipo de conversor e do sistema em que está inserido podem ser implementadas de inúmeras formas. A técnica utilizada nesta dissertação, foi o SPWM sendo sobre essa técnica que recai este capítulo podendo outras técnicas de modulação PWM ser consultadas em (Namboodiri, 2014) (Singh, 2014) (Patel, 2009).

#### SPWM – Sinusoidal Pulse Width Modulation (Meia ponte)

O modo de funcionamento do SPWM para um conversor meia ponte é relativamente simples, pois este conversor é formado unicamente por um braço de IGBTs como ilustra a Figura 2.15

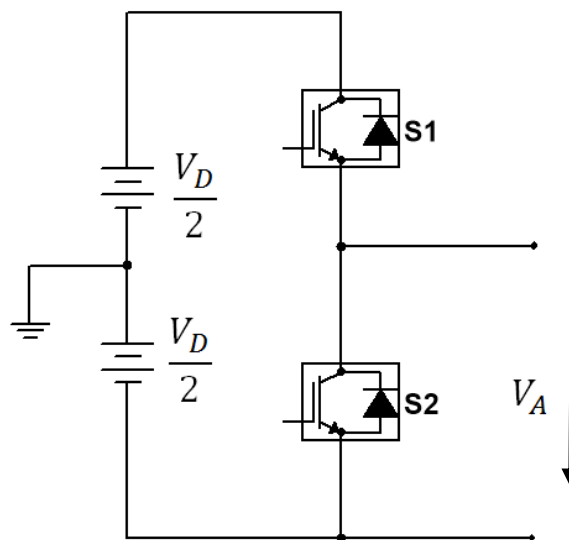


Figura 2.15 - Conversor meia ponte

A geração do SPWM consiste em comparar uma onda triangular com frequência  $f_{tri}$  e amplitude  $U_{tri}$ , com uma onda de referência sinusoidal de frequência  $f_{ref}$  e amplitude  $U_{ref}$ .

A frequência  $f_{tri}$  controla a velocidade de comutação dos IGBTs nos conversores. Com intuito de obter bons resultados de modulação existem alguns aspetos a ter em conta. Em (Rashid, 2011) é referido que dependendo dos valores de  $m$  e  $r_m$  o conteúdo harmónico será alterado.

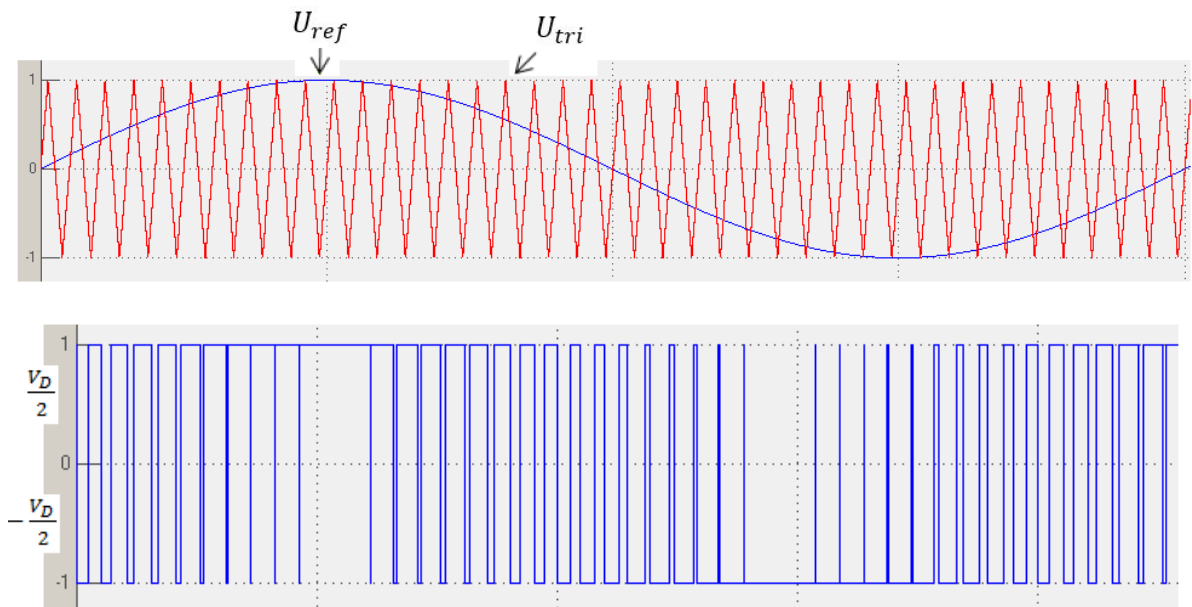
O índice de modulação  $m$  dado pela equação (4), terá de cumprir o requisito  $m < 1$  para que não haja uma sobremodelação. Quanto ao rácio de modelação  $r_m$  presente na equação (5) é aconselhável que cumpra o requisito  $r_m > 20$  assim como tome um valor inteiro,

múltiplo de 3 de modo a evitar sub-harmónicas e, garantir uma modulação PWM igual nas três fases , no caso de um sistema trifásico (Rashid, 2011) .

$$m = \frac{U_{ref}^{max}}{U_{tri}^{max}} \quad (4)$$

$$r_m = \frac{f_{tri}}{f_{ref}} \quad (5)$$

Na Figura 2.16 estão ilustrados o método de geração de PWM e a tensão na saída  $V_A$ .



**Figura 2.16 - Geração de sinal PWM para conversor meia ponte (a azul a onda referência e a vermelho triangular) e tensão de saída  $V_A$**

Caso  $U_{ref} > U_{tri}$ ,  $V_A = \frac{V_D}{2}$ . Por outro lado caso  $U_{ref} < U_{tri}$ ,  $V_A = -\frac{V_D}{2}$ .

Outro aspeto importante é o facto de ambos os IGBTs não poderem estar a conduzir simultaneamente pois caso isso acontecesse a fonte estaria em curto-circuito.

### **SPWM – Sinusoidal Pulse Width Modulation (Ponte completa)**

O modo de funcionamento do SPWM para um conversor ponte completa tem como principal diferença a introdução de um segundo braço de IGBTs, como ilustra a Figura 2.17 onde está ilustrado o conversor com topologia ponte completa.

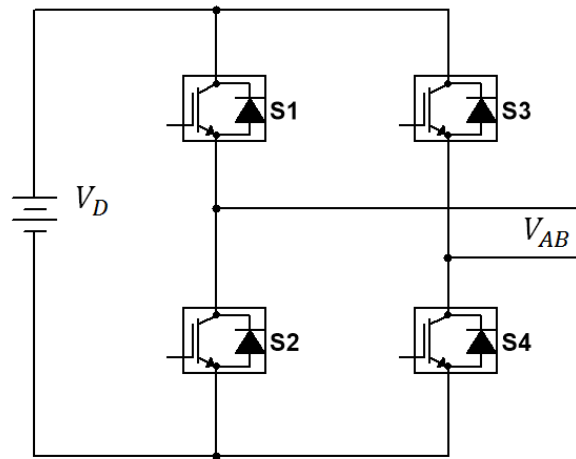


Figura 2.17 - Conversor ponte completa.

A introdução de um novo braço de IGBTs leva criação de uma segunda onda de referência com sinal inverso  $-U_{ref}$ . A criação desta segunda onda de referência é necessária quando o controle dos IGBTs de ambos os braços do conversor é feito isoladamente. Na Figura 2.18 está ilustrado o método de geração de PWM e tensão de saída  $V_{AB}$ .

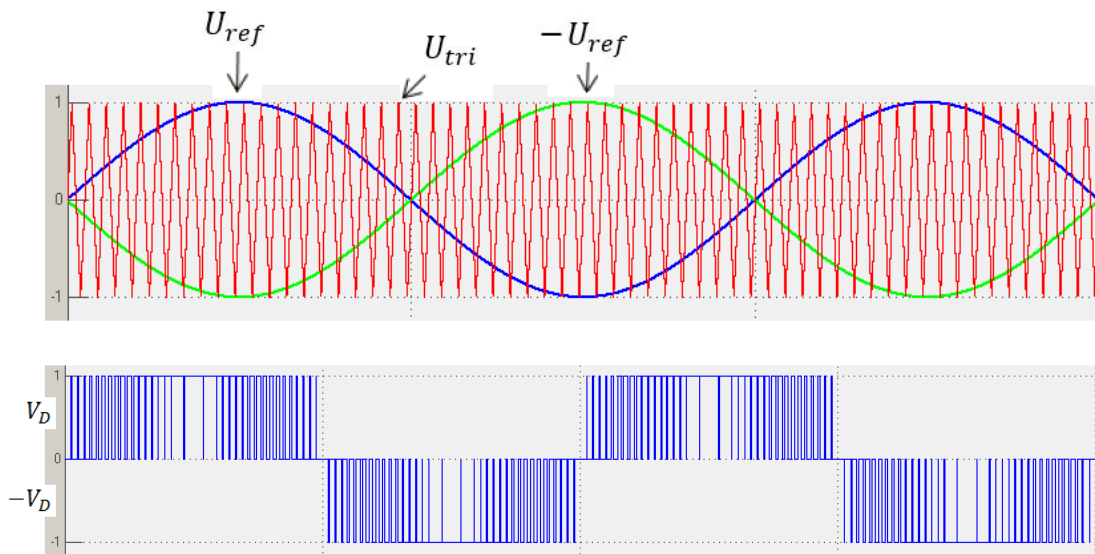


Figura 2.18 - Geração de PWM para conversor ponte completa (a azul a onda referência, a verde a onda de referência inversa e a vermelho triangular) e tensão de saída  $V_{AB}$

O controle do primeiro braço de IGBTs é efetuado da seguinte forma:

Caso  $U_{ref} > U_{tri}$ ,  $V_{AB} = V_D$ , então caso  $U_{ref} < U_{tri}$ ,  $V_{AB} = 0$ .

Por outro lado o controle do segundo braço de IGBTs é efetuado da mesma forma mas utilizando a referência inversa  $-U_{ref}$  que foi referida anteriormente. Posto isto caso  $-U_{ref} > U_{tri}$ ,  $V_{AB} = -V_D$  então caso  $-U_{ref} < U_{tri}$ ,  $V_{AB} = 0$ .



## **2.3 Síntese do Capítulo**

Neste capítulo, foram abordadas as matérias que mais interesse levantam para a compreensão do tema desta dissertação. Efetuou-se uma breve introdução histórica à descoberta da supercondutividade, passando para uma descrição das propriedades que tornam um material supercondutor.

Na segunda parte foi analisado o sistema SMES. Fez-se um levantamento bibliográfico que permitiu detalhar todos os constituintes, aplicações e modos de funcionamento do sistema.

Por fim, foram analisadas as estratégias de controlo necessárias para um correto funcionamento do sistema.

## 3 Simulação do sistema SMES

Neste capítulo será apresentado o problema que esta dissertação se propõe resolver, neste caso uma interrupção total no fornecimento de energia. Serão também detalhados todos os blocos envolvidos na simulação sistema SMES, bem como as simulações efetuadas em Simulink/MatLab.

### 3.1 Interrupção

Mitigar problemas associados à rede elétrica é o objetivo da utilização do sistema SMES, a sua utilização propõe-se soluções para problemas como, transientes, interrupções, subtensões, sobretensões, distorções entre outros cujos detalhes podem ser consultados em (Seymour, 2005).

Neste subcapítulo será descrito um dos problemas que ocorrem nas redes elétricas, uma interrupção total e/ou parcial no fornecimento de energia.

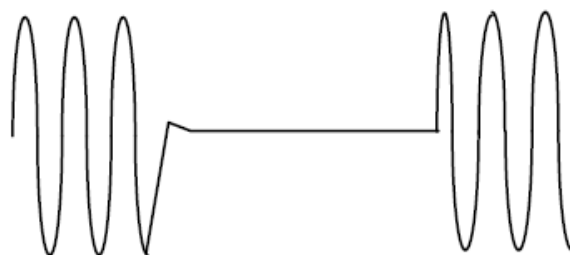


Figura 3.1 Interrupção completa

Uma interrupção pode ser descrita por um decaimento brusco do valor da tensão de alimentação, entre 90% e 5% seguido de um restabelecimento dessa mesma tensão de alimentação, após um determinado intervalo de tempo (Alcaria, 2012). Quando a amplitude da interrupção é de 100% está-se perante uma interrupção total.

A interrupção pode ser catalogada consoante o intervalo de tempo em que ocorre (Seymour, 2005):

- Instantânea - Ocorre entre 0,5 e 30 ciclos
- Momentânea - Ocorre entre 30 ciclos a 2 segundos
- Temporária - Ocorre entre 2 segundos a 2 minutos
- Permanente - Ocorre num período superior a 2 minutos

As interrupções são muitas das vezes causadas por agentes naturais como por exemplo: intempéries, ventos, chuva, descargas atmosféricas. As consequências associadas vão desde o mau funcionamento do equipamento, com diminuição do rendimento, perdas de dados e erros de processamento, ou nos casos mais graves interrupção total do seu funcionamento, que neste ultimo caso acarreta sempre impactos financeiros.

### 3.2 Modelo Simulink/MatLab do sistema SMES

Neste capítulo será apresentada a simulação de todo o sistema SMES ilustrado na Figura 3.2 através da ferramenta Simulink/MatLab, este sistema foi simulado admitindo alguns dos parâmetros já dimensionados em (Oliveira, 2010).

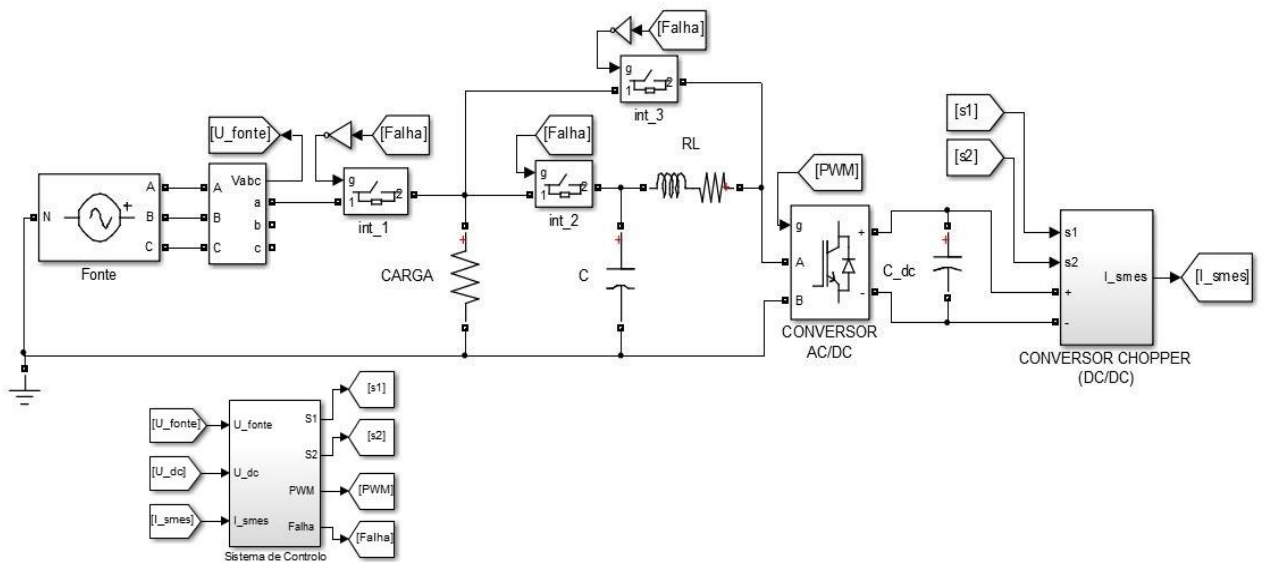


Figura 3.2 - Modelo do sistema SMES

No entanto, pelo sistema ser monofásico foi necessário proceder a algumas alterações, ficando o sistema com os seguintes parâmetros:

- Período de interrupção total: 0,02 s
- Carga: 10 k $\Omega$
- $L_{SMES}$ : 0,01 H
- $I_{max}$ : 70 A
- $C_{DC}$ : 0,19 mF
- $f_{PWM}$ : 10 kHz



Na Figura 3.4 estão ilustradas as tensões na fonte e na carga sem interrupção.

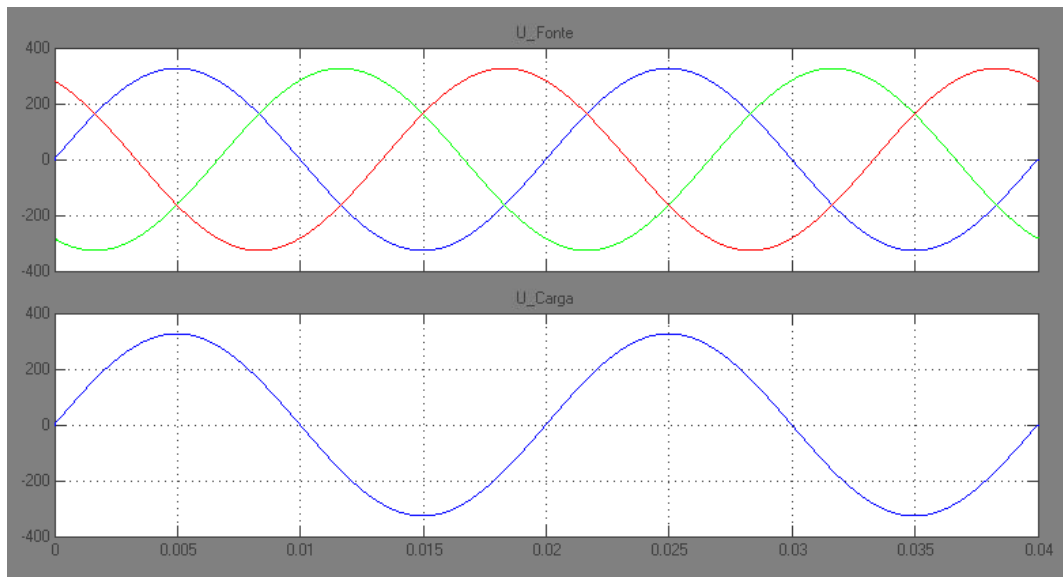


Figura 3.4 - Forma de onda na fonte e carga

Na Figura 3.4, está ilustrado o sistema trifásico de tensões gerado na fonte, no entanto como o sistema foi dimensionado para uma tensão de alimentação monofásica, só uma das fases será utilizada para o restante sistema. A utilização de uma fonte trifásica em detrimento de uma fonte monofásica deve-se ao facto de o método escolhido para detetar a falha receber como entrada um sistema de tensões trifásicas.

Como já foi referido anteriormente, não havendo interrupção no fornecimento de energia o sistema funciona normalmente entregando energia à carga através da fonte carregando a SMES até ao valor máximo definido  $I_{max}$  de 70 A, como ilustrado na Figura 3.5

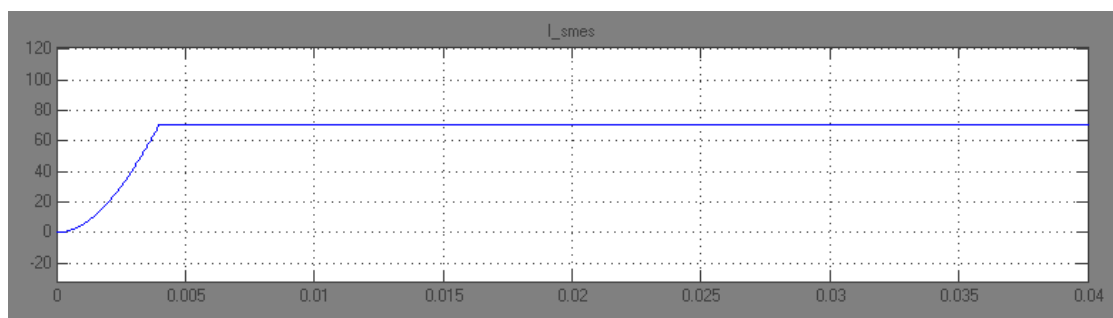


Figura 3.5 Corrente na SMES sem falha

Inicialmente o SMES encontra-se descarregado e  $I_{SMES} = 0$  A. Seguidamente inicia o carregamento da bobina até ao valor máximo definido  $I_{max}$ , ao atingir esse valor o conversor *chopper* entra em modo persistente mantendo a corrente constante no seu interior, tal acontece até que ocorra uma interrupção e o sistema reaja para a colmatar.

### Com interrupção

Na Figura 3.6 está ilustrado o circuito de transferência de energia entre a SMES e a carga que necessita de alimentação devido a interrupção completa. De forma a garantir que o percurso seguido é o assinalado a verde na Figura 3.6 colocam-se os interruptores int\_1 e int\_3 a OFF e int\_2 a ON.

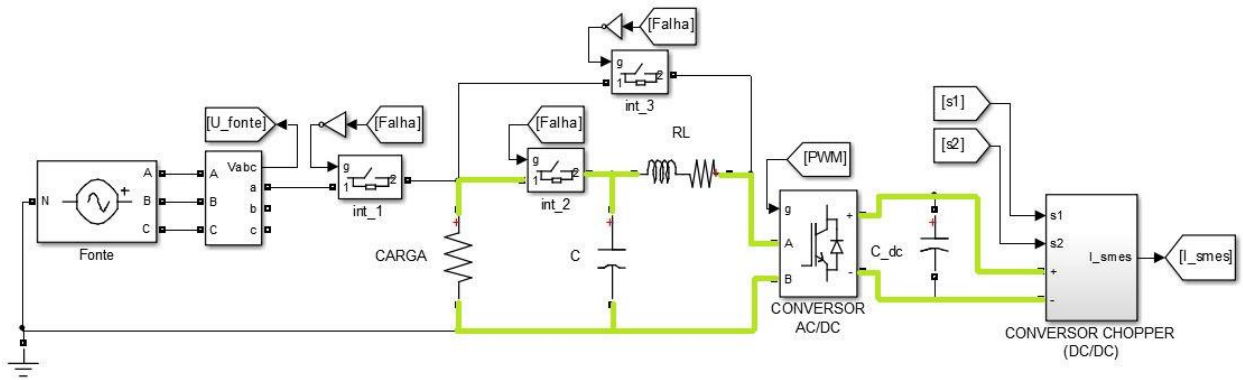


Figura 3.6 Circuito de transferência de energia entre a SMES e a carga quando ocorre uma falha

No momento em que ocorre uma falha a carga deixa de receber alimentação através da fonte e passa a ser alimentada através da SMES. A Figura 3.7 ilustra a ocorrência de uma interrupção completa na fonte e consequente falha de fornecimento à carga.

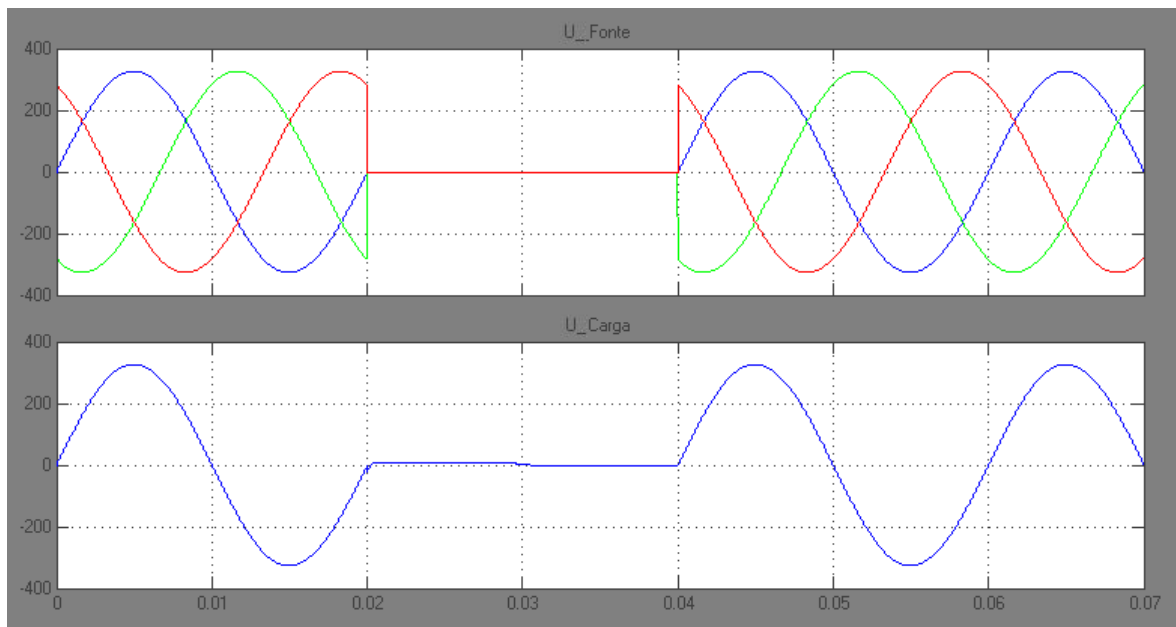


Figura 3.7 – Tensão na fonte e tensão na carga na presença de falha

O sistema foi projetado tendo em conta uma interrupção total de 0,02 s. Quando ocorre uma falha, todo o sistema terá de responder para a colmatar, sendo o sistema de controlo o responsável por desencadear os processos necessários para responder à interrupção.

O sistema de controlo está dividido em quatro subsistemas, são eles:

- **Condicionamento de sinal**

Na Figura 3.8 estão ilustrados por ordem os processos realizados pelo subsistema condicionador de sinal, este subsistema recebe como sinais de entrada as tensões geradas na fonte  $U_{abc}$ , colocando-as em pu, de seguida recorrendo à transformada de Clarke e Park (Crowhurst, 2010) (Roshan, 2006) transforma o sistema inicial de coordenadas  $U_{abc}$  em  $U_{dq0}$ . Por fim, recorrendo à transformada inversa de Clarke e Park obteve-se o sinal  $U_{a\_ref}$ .

O sinal  $U_{a\_ref}$  utiliza-se como  $U_{ref}$  na modelação dos sinais PWM, e o  $U_{dq0}$  utiliza-se para identificar a ocorrência de falha.

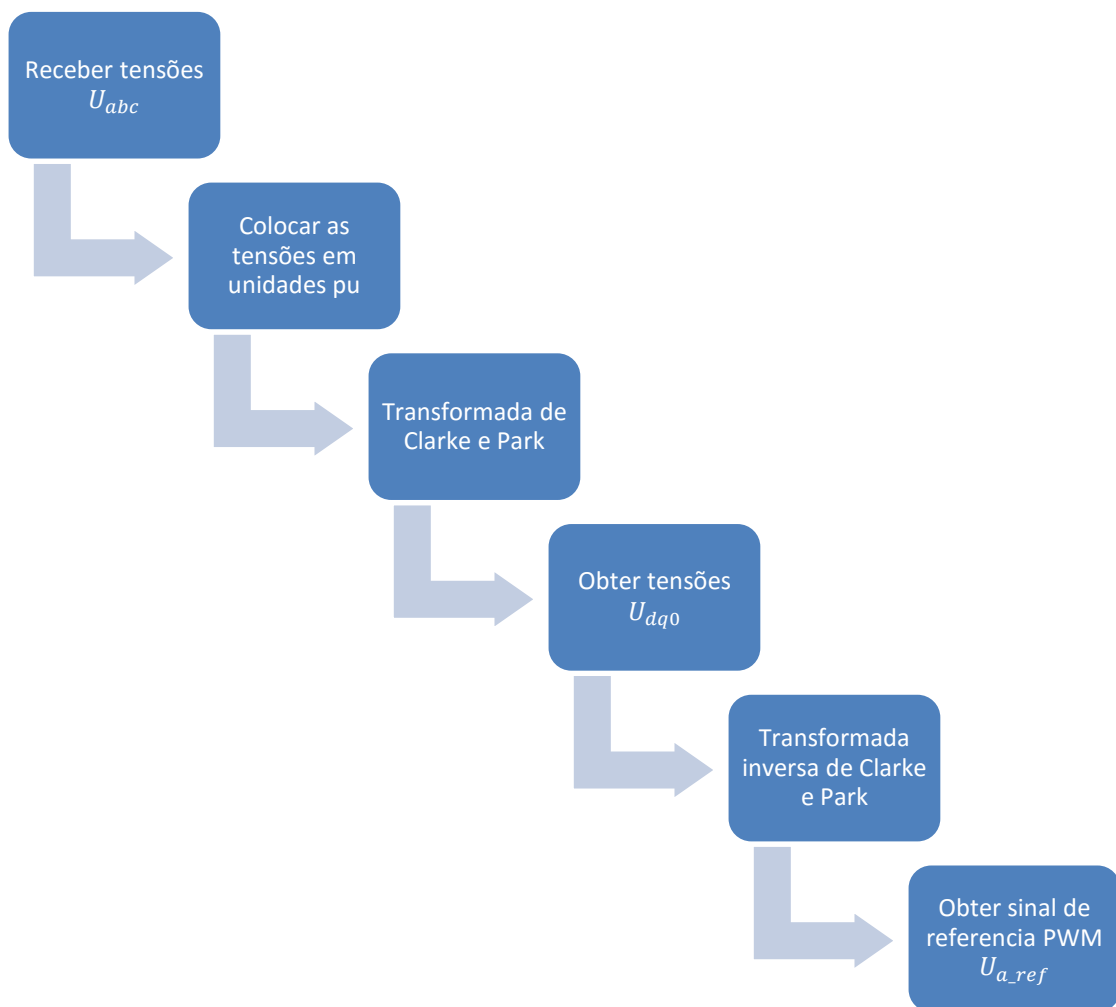


Figura 3.8 - Condicionador de Sinal

- **Detetor de falha**

A sequência de processos realizados pelo subsistema detetor de falha estão ilustrados na Figura 3.9. Este subsistema tem como o próprio nome indica o objetivo de detetar a falha sendo que para isso realiza os seguintes processos:

Inicialmente recebe como entrada as tensões  $U_{dq0}$  e procede à sua decomposição em duas componentes  $U_d$  e  $U_q$ .

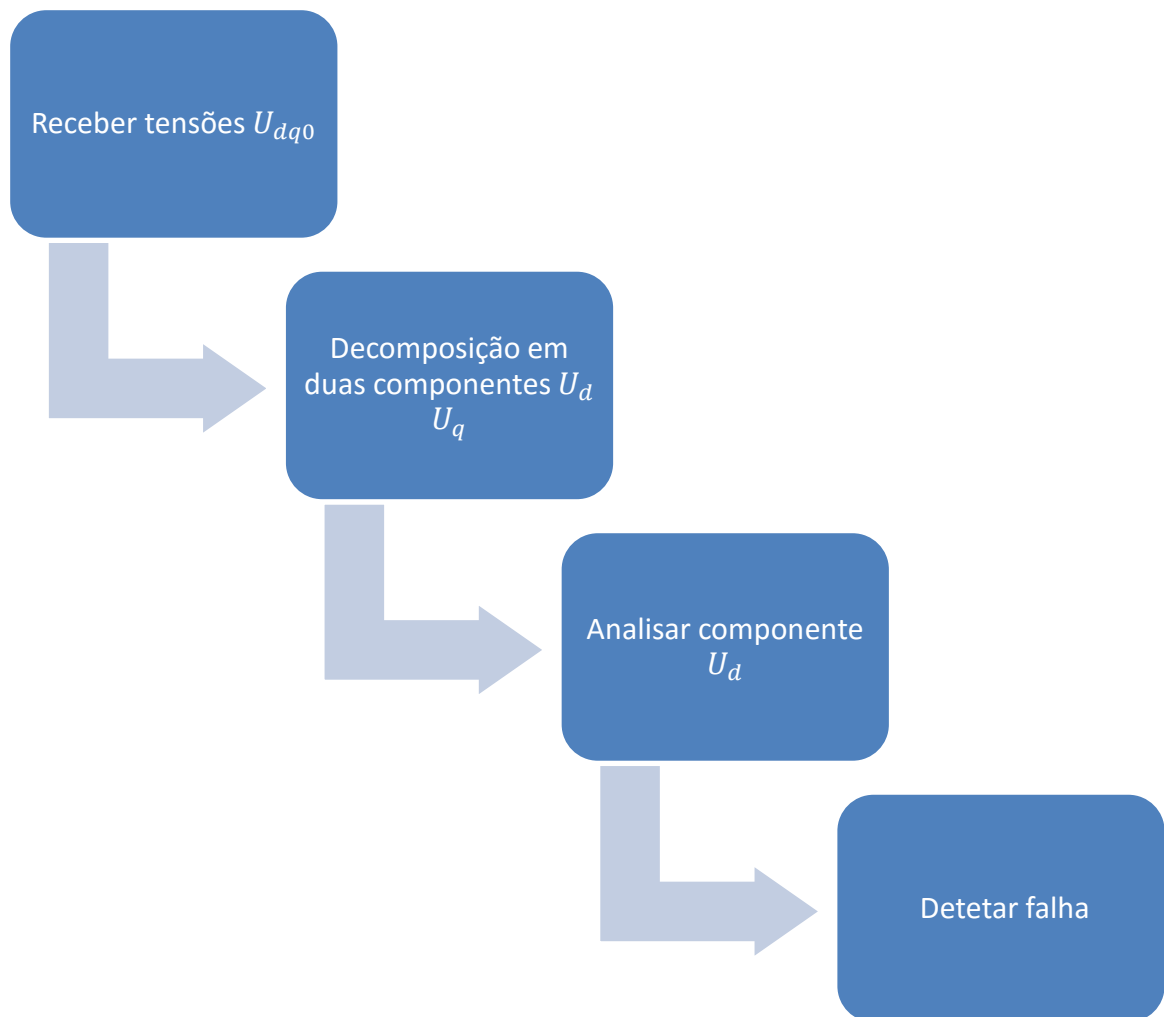


Figura 3.9 - Detetor de falha

De seguida através da análise da componente  $U_d$ , sabe-se o exato momento em que a falha ocorre. Caso a componente  $U_d$  seja igual a 1 o sistema está a funcionar corretamente, caso  $U_d$  seja igual a 0 o sistema está em falha.

Este subsistema tem como saída a variável falha que assume o valor 1 ou 0, se existir ou não falha, como demonstra o gráfico Falha ilustrado na Figura 3.10.



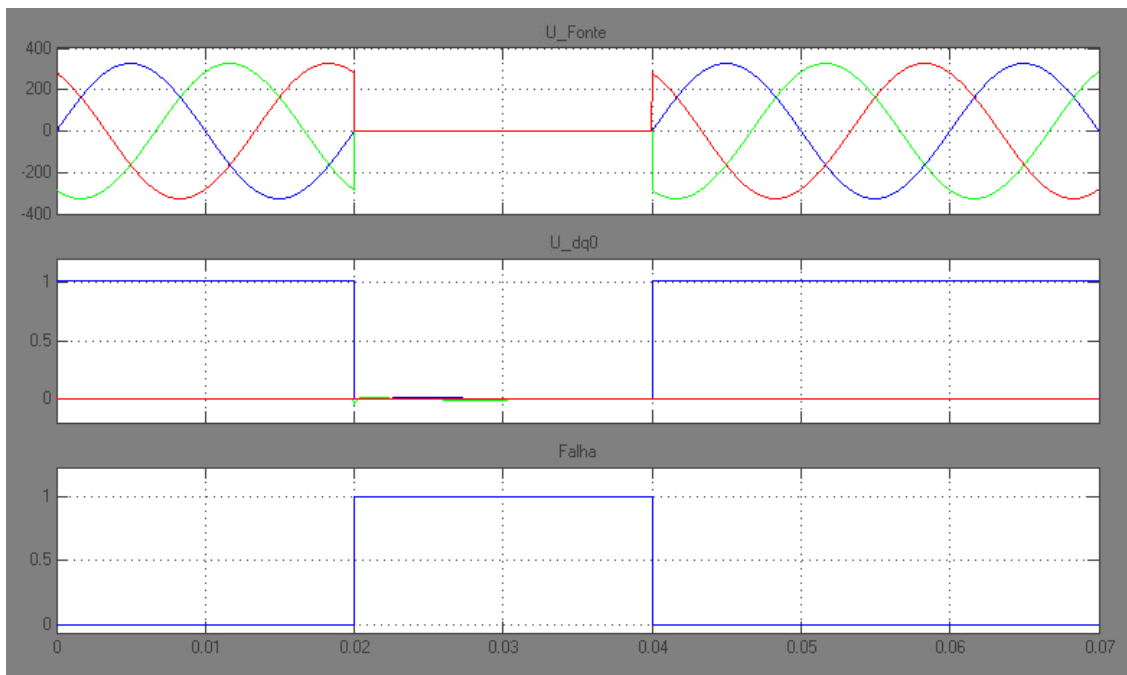


Figura 3.10 – Tensão na fonte  $U_{fonte}$ ,  $U_{dq0}$ , falha

- **Controlador *chopper* (DC/DC)**

Este subsistema é responsável pela comutação entre modos de funcionamento do SMES, carregar, descarregar e persistente. Para tal, monitoriza constantemente, os sinais de falha  $U_{DC}$  e  $I_{SMES}$  de modo a verificar o estado do sistema em cada instante. Como por exemplo: Verificar se há ou não falha, verificar o valor da corrente na bobina.

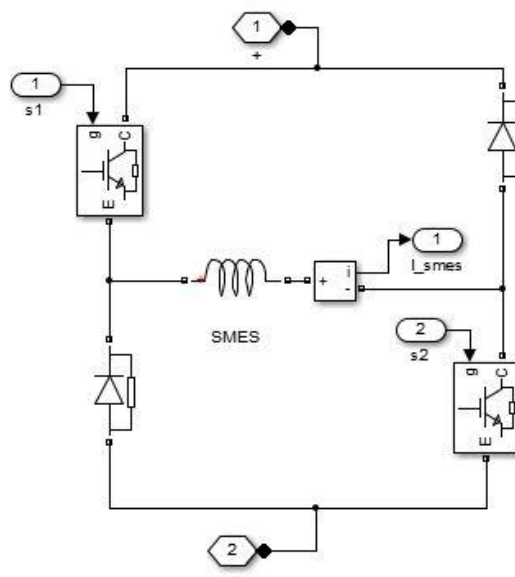


Figura 3.11 - Conversor *chopper* com SMES

A Figura 3.12 ilustra sequência de processos realizados pelo subsistema controlador *chopper*.

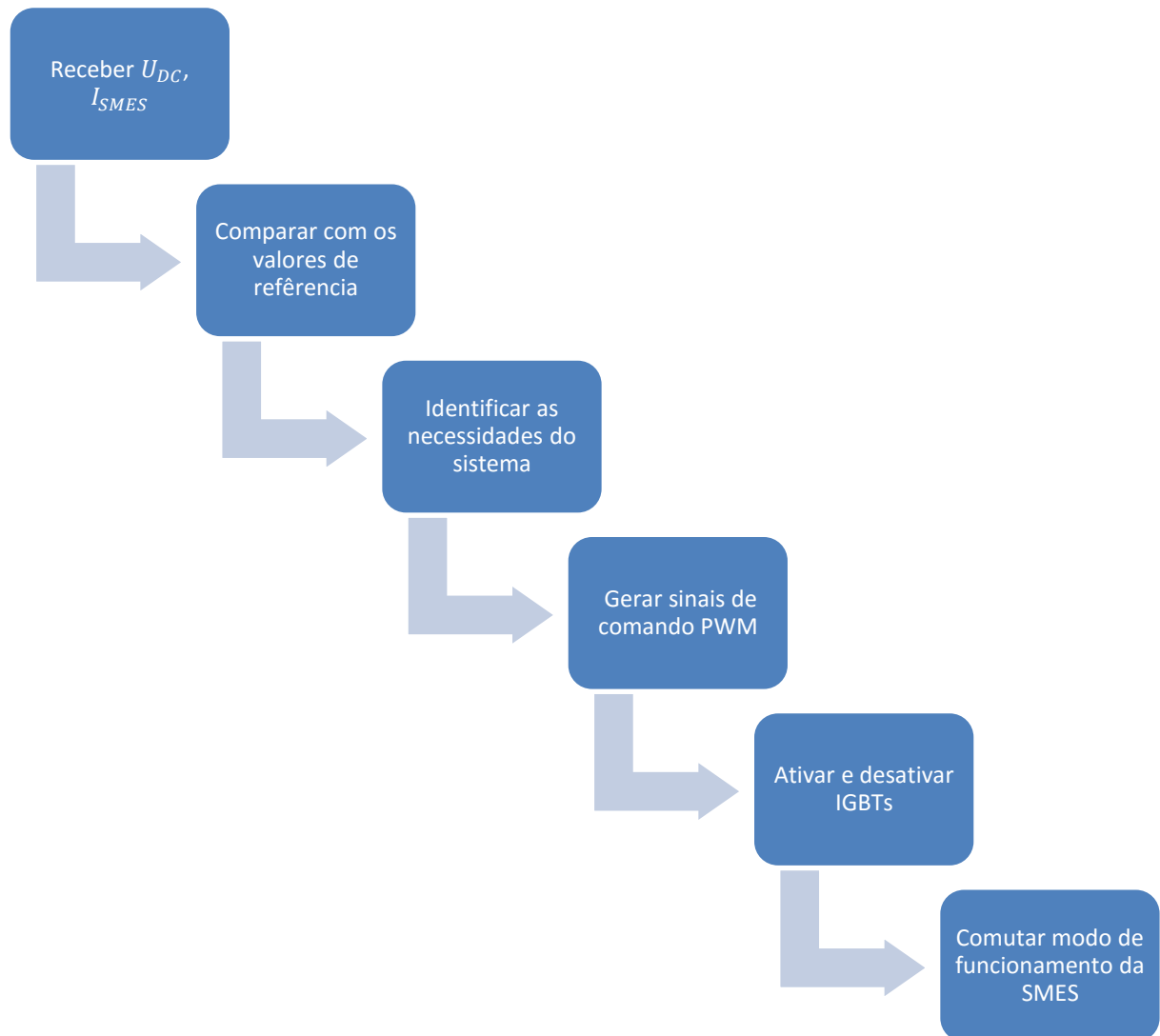
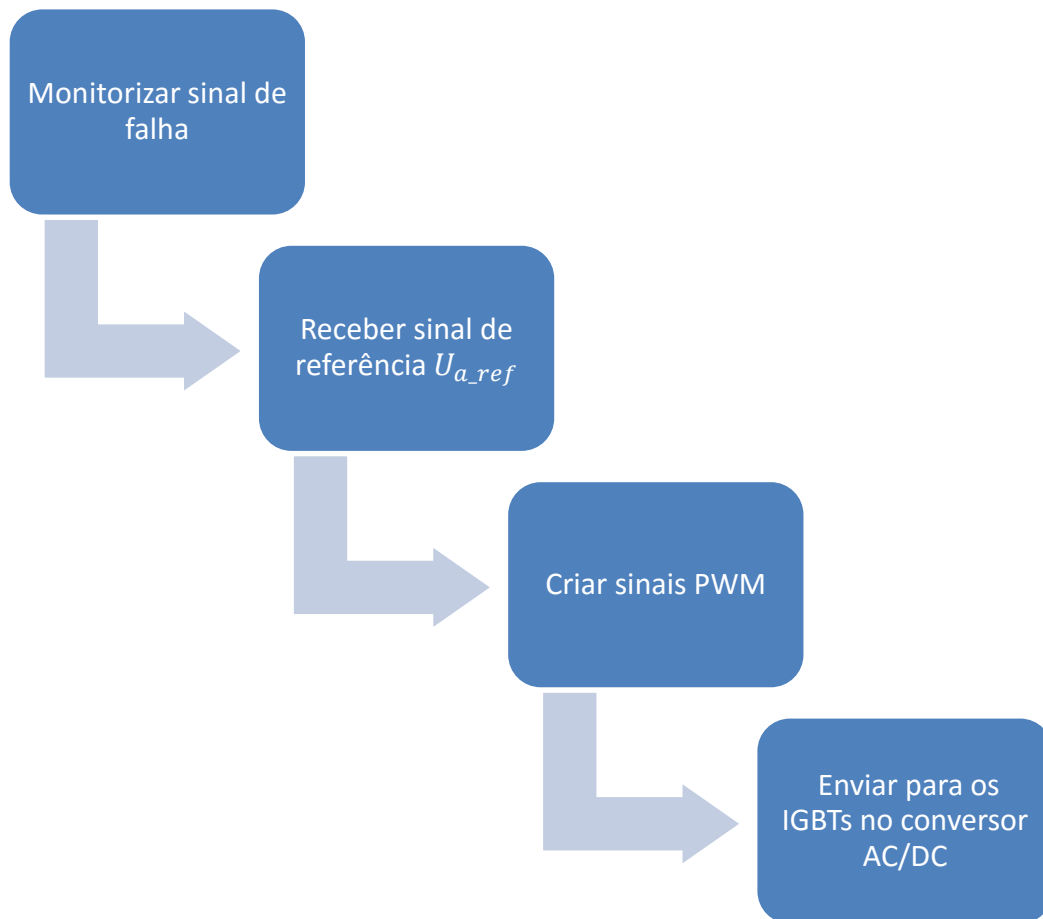


Figura 3.12 - Controlador *chopper* (DC/DC)

Consoante o estado em que o sistema se encontra, o controlador *chopper* gera dois sinais PWM, S1 e S2 que serão usados para ativar ou desativar os IGBTs presentes no conversor ilustrado na Figura 3.11 e consequentemente alternar entre modos de funcionamento da SMES.

- **Gerador de PWM**

O gerador de PWM é o subsistema utilizado para controlar os IGBTs no conversor AC/DC, este subsistema só será útil quando a variável falha for igual a 1 ou seja, quando existir de falha. Só nesse caso é necessário criar os sinais PWM pois há necessidade do conversor funcionar como inversor. Na Figura 3.13 estão ilustrados os processos realizados neste subsistema por ordem sequencial.



**Figura 3.13 - Gerador de PWM**

O modo de funcionamento do gerador de PWM é relativamente simples, o subsistema possui como entradas o sinal de falha, e o sinal  $U_{a\_ref}$  obtido no processo condicionador de sinal que será utilizado como onda de referência para a modulação SPWM, como mencionado no subcapítulo 2.2.4. Na Figura 3.14 estão ilustrados os sinais de entrada falha e  $U_{a\_ref}$  assim como os sinais PWM gerados. Como se pode observar só quando ocorre falha são gerados sinais PWM.

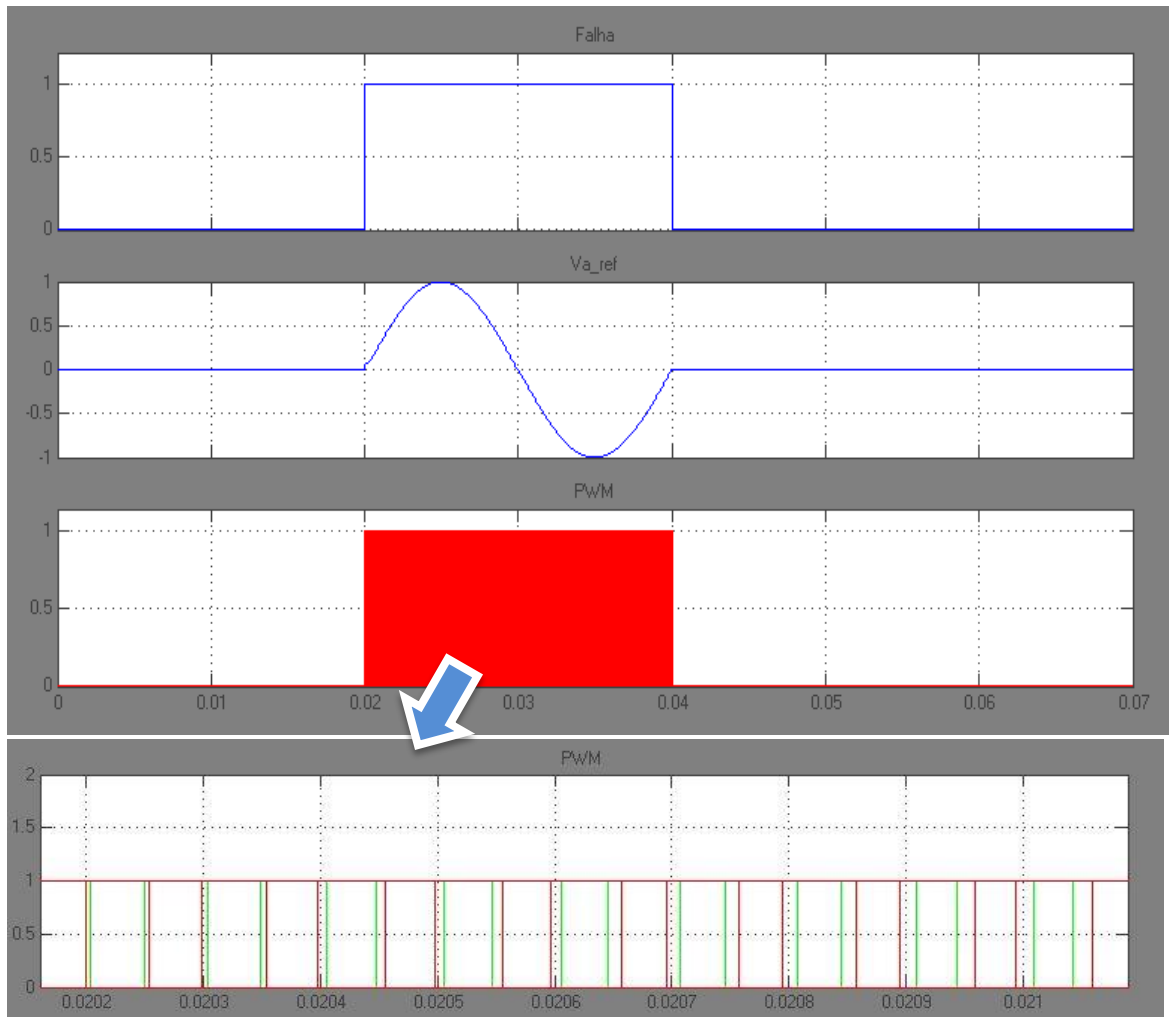


Figura 3.14 - Sinais de falha ,  $U_{a\_ref}$  e PWM

### 3.2.2 Simulação do sistema SMES sem filtro

Como já foi referido no caso de interrupção na fonte o objetivo de todo o sistema é entregar energia à carga. A Figura 3.15 ilustra o comportamento de todo o sistema SMES sem a introdução do filtro.

Analisando os gráficos presentes na Figura 3.15 constata-se que no gráfico  $U_{carga}$  está presente uma única fase de  $U_{abc}$ , que no período em que ocorre a falha , adquire os sinais de PWM não filtrados, à saída do conversor AC/DC em modo inversão.

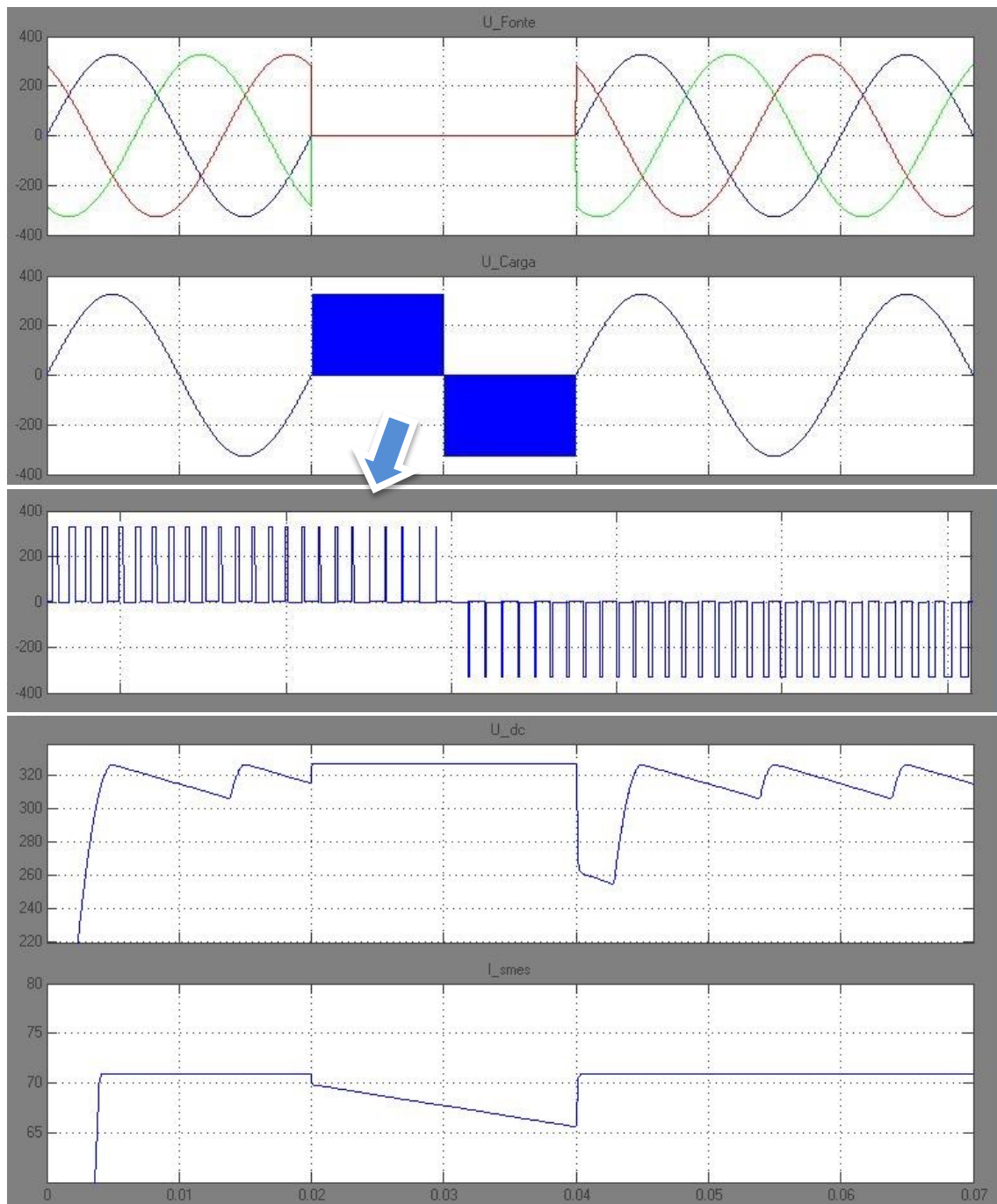


Figura 3.15 - Simulação do sistema SMES sem filtro

Analisando a tensão  $U_{DC}$  verifica-se que esta se mantém-se relativamente constante com um valor médio de cerca de 316 V até ocorrer a falha entre os 0,02s e 0,04s e passe a assumir o valor de referência 326 V imposto pela SMES no interior do conversor *chopper*.

Quanto à corrente  $I_{SMES}$  cumpre os requisitos de dimensionamento estipulados no capítulo 3.2, isto é, quando atinge o valor  $I_{max} = 70$  A estabiliza até que ocorra falha e comece a descarregar, como se pode observar no gráfico  $I_{SMES}$  na Figura 3.15.

### 3.2.3 Simulação do sistema SMES com filtro

Com o intuito de filtrar as harmônicas de alta frequência nos sinais PWM e obter um sinal sinusoidal com frequência  $f$  de 50Hz, foi dimensionado um filtro passa-baixo RLC como ilustra a Figura 3.16.

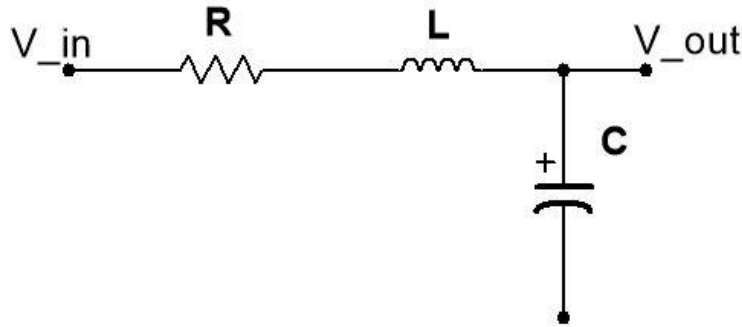


Figura 3.16 - Filtro RLC

Sabe-se que caso de um filtro desta natureza a frequência de corte  $f_c$  é dada pela equação

(6) :

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (6)$$

Em que  $L$  é a indutância da bobina e  $C$  a capacidade do condensador.

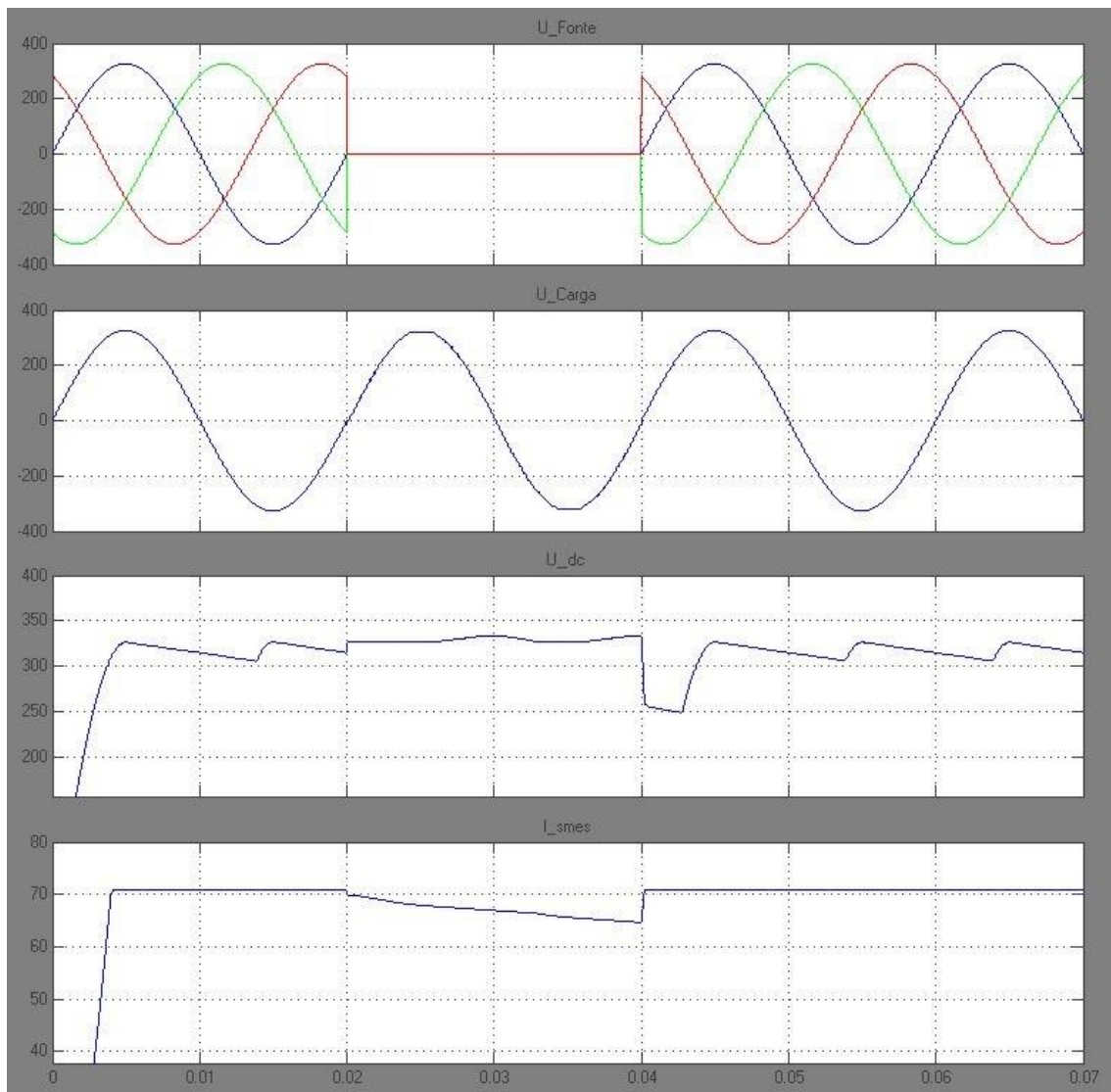
Visto que os sinais PWM têm uma frequência de comutação de 10 kHz ( $V_{in}$ ) e pretende-se obter na saída uma senoide com frequência 50Hz ( $V_{out}$ ), sabe-se que uma boa aproximação da frequência de corte será a media geométrica entre ambas as frequências, isto é:

$$f_c \approx \sqrt{f_s \cdot f_{PWM}} \Leftrightarrow \sqrt{50 \cdot 10k} = 707,1 \text{ Hz}$$

Substituindo  $F_c = 707,1 \text{ Hz}$  na equação (6) obteve-se os seguintes parâmetros para o filtro RLC:

$$R = 4,47 \, \Omega \quad L = 1 \text{ mH} \quad C = 50 \, \mu\text{F}$$

Na Figura 3.17 está ilustrado o comportamento do sistema SMES com a introdução de um filtro RLC.



**Figura 3.17 - Simulação do sistema SMES com filtro**

Fazendo um comparativo entre a tensão na carga sem interrupção representada por  $U_{carga}$  na Figura 3.4 e quando há interrupção representado na Figura 3.17 conclui-se que ambas são bastante semelhantes, isto é ambas apresentam a mesma amplitude e frequência.

### **3.3 Síntese do Capítulo**

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos através das simulações do sistema SMES em MatLab/Simulink. Apresentou-se uma descrição de todos elementos envolvidos no sistema e do problema que este se propunha a colmatar.

Por fim, apresentaram-se os resultados das simulações de todo o sistema tendo em conta a introdução e a não introdução de um filtro RLC. Com isto pretendeu-se demonstrar as diferenças que a introdução o filtro produziria na saída do conversor AC/DC.





## 4 Controlador do sistema SMES

Neste capítulo serão apresentados os componentes utilizados para o dimensionar e implementar o controlador do sistema à exceção da SMES. Visto que não foi possível construir uma unidade SMES, para testar a implementação dos restantes elementos envolvidos no sistema, substituiu-se a SMES e o condensador em paralelo, por uma fonte DC.

Na Figura 4.1 estão ilustradas todas as montagens experimentais utilizadas na implementação do controlador e o módulo de IGBTs.

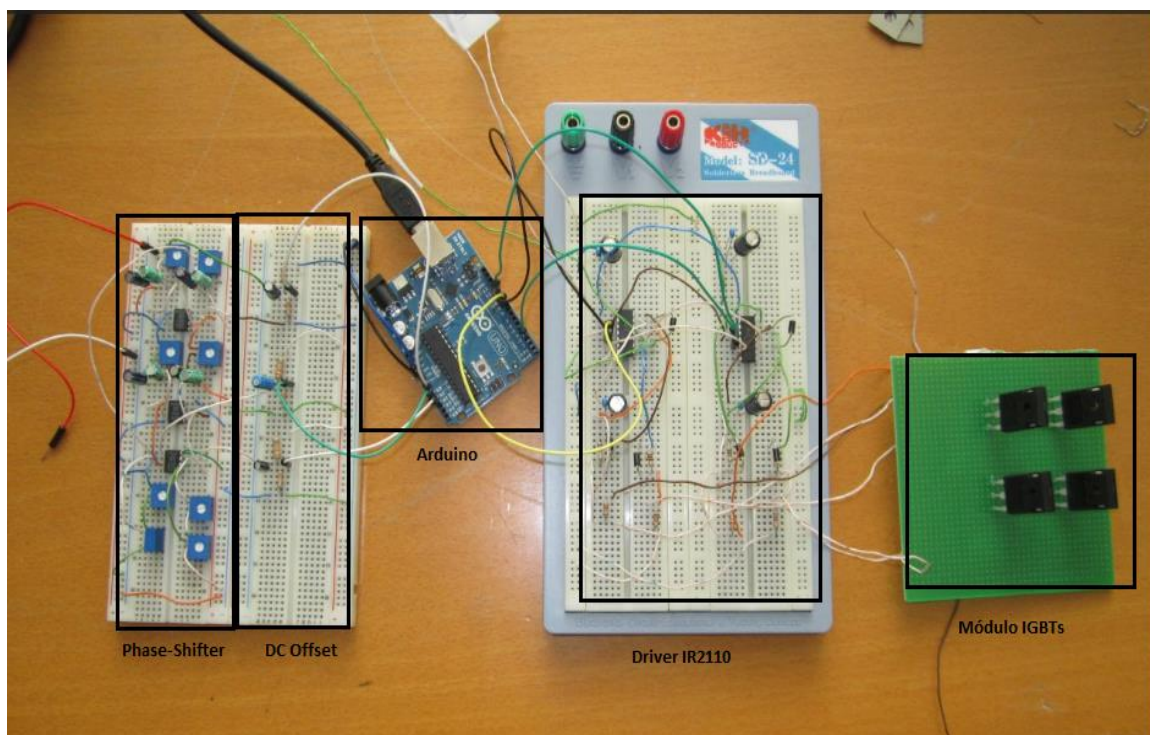


Figura 4.1 – Montagem experimental do controlador

A implementação do controlador está dividida em várias etapas que serão detalhadas neste capítulo, a Figura 4.2 ilustra a sequencialmente todas as etapas realizadas.

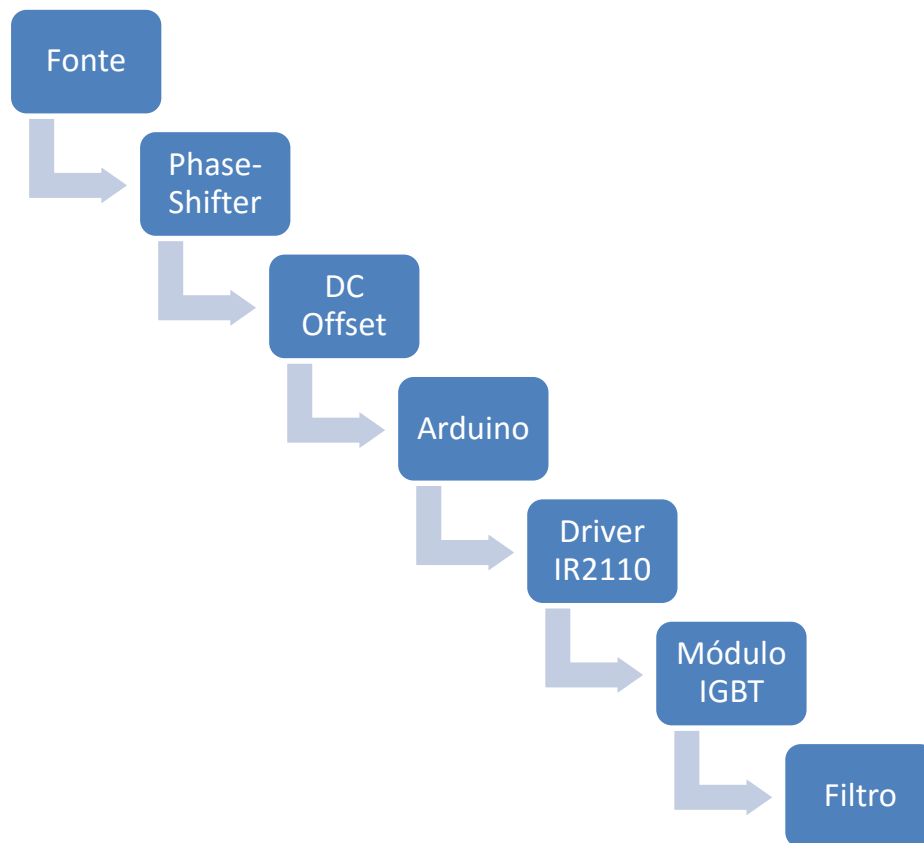


Figura 4.2- Sequência de blocos do sistema

## 4.1 Fonte

Na Figura 4.3 está ilustrada uma tensão com 1,50 V AC, 50 Hz utilizada para simular a tensão na rede elétrica, esta tensão foi regulada com o valores mencionados e não com o valor padrão 230 V AC, pois o valor máximo que o Arduino deve operar  $U_{arduino}$  são 5 V.

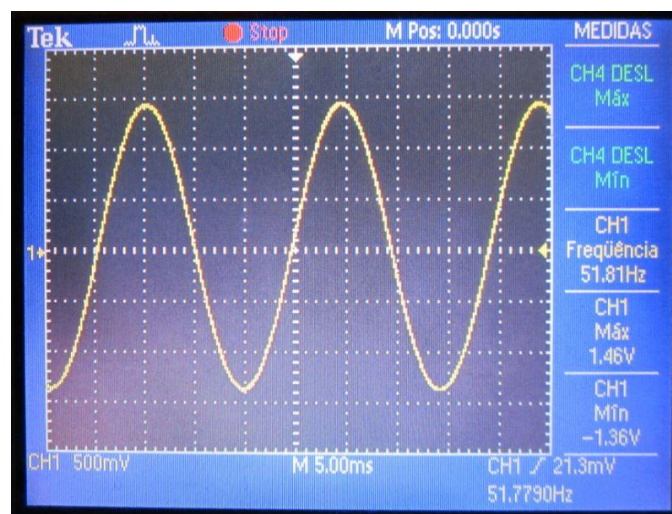


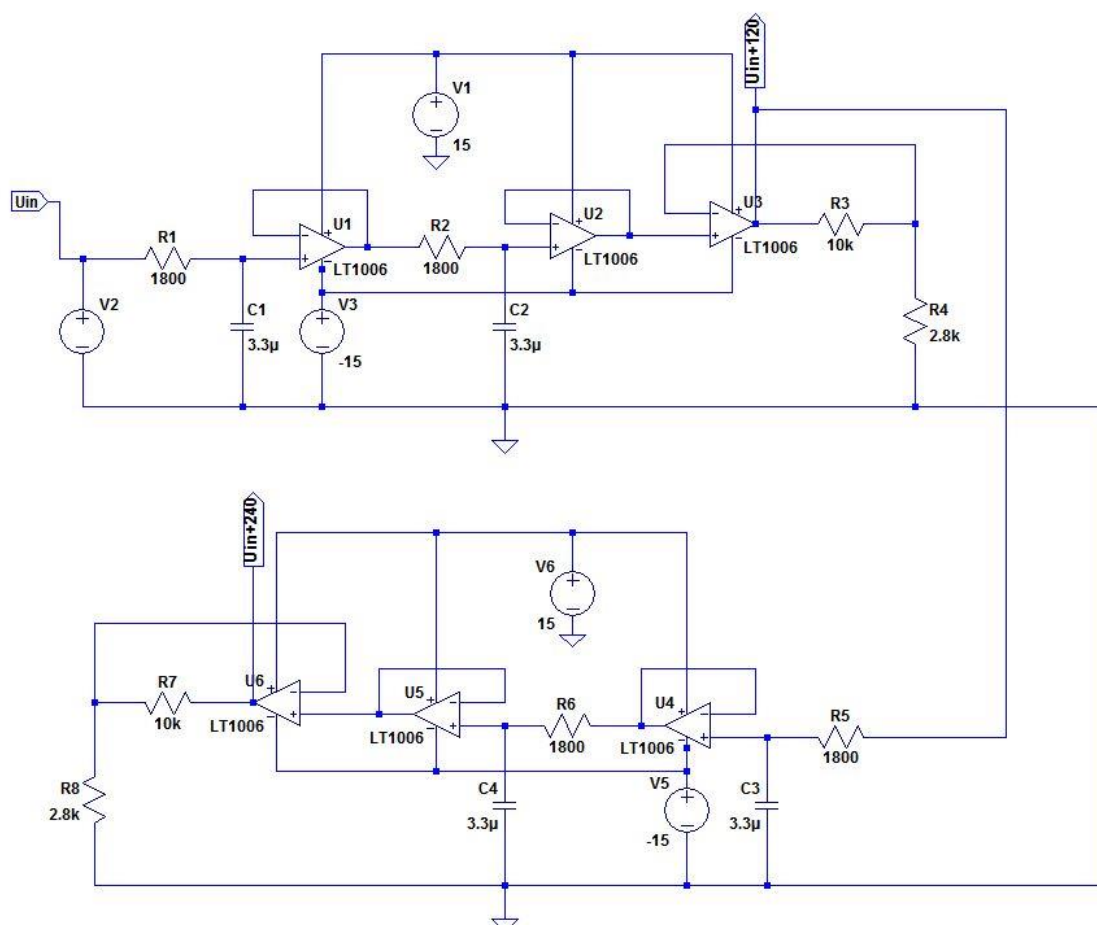
Figura 4.3 Onda gerada pela fonte

## 4.2 Phase-Shifter

Como referido em 3.2.1 devido ao método utilizado para a deteção da falha, receber um sistema trifásico de tensões foi necessário criar uma montagem que desloca-se a onda de entrada de  $120^\circ$  e  $240^\circ$ . Neste subcapítulo serão demonstrados o dimensionamento e implementação dessa mesma montagem denominada Phase-Shifter.

## Dimensionamento

Ao contrário do que sucede nas simulações efetuadas em MatLab/Simulink no capítulo anterior, em que a fonte gera um sistema trifásico de tensões mas só uma fase é utilizada para o restante sistema, na implementação prática optou-se por uma estratégia diferente, isto é, como o sistema é monofásico a fonte cria uma única tensão, que será inserida na montagem Phase-Shifter ilustrada na Figura 4.4, essa montagem irá efetuar a desfasagem da onda de entrada.



### Figura 4.4 - Phase-Shifter

O Phase-Shifter está dividido em dois blocos, sendo cada um dos blocos constituído por andares RC. O primeiro bloco recebe a tensão  $U_{in}$  proveniente da fonte, e deslocando-a  $120^\circ$  colocando à saída a tensão  $U_{in+120}$ .

A Figura 4.5. ilustra o primeiro bloco do Phase-Shifter.

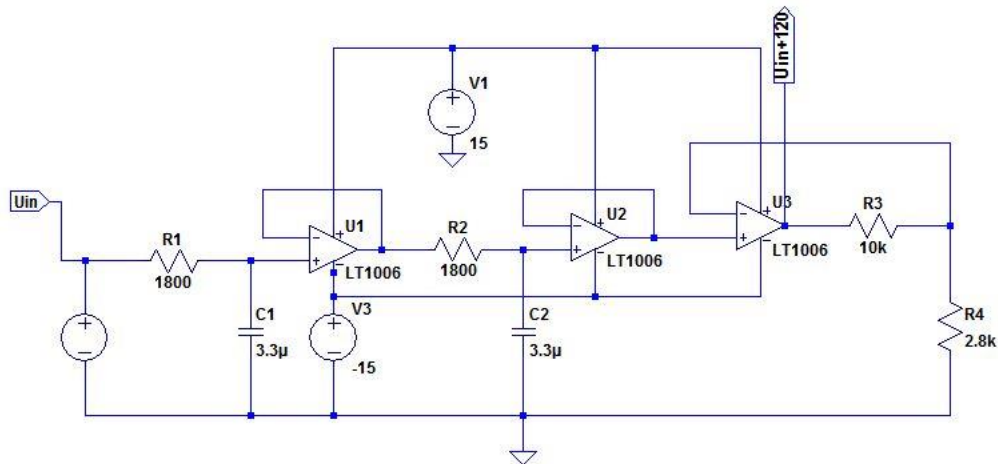


Figura 4.5 - Primeiro andar do Phase-Shifter

Na Figura 4.6 está ilustrado o segundo bloco que recebe como entrada a saída proveniente do primeiro bloco  $U_{in+120}$ , deslocando-a novamente  $120^\circ$  e colocando na saída  $V_{in+240}$  uma tensão desfasada  $120^\circ$  da entrada  $U_{in+120}$  e  $240^\circ$  de  $U_{in}$ .

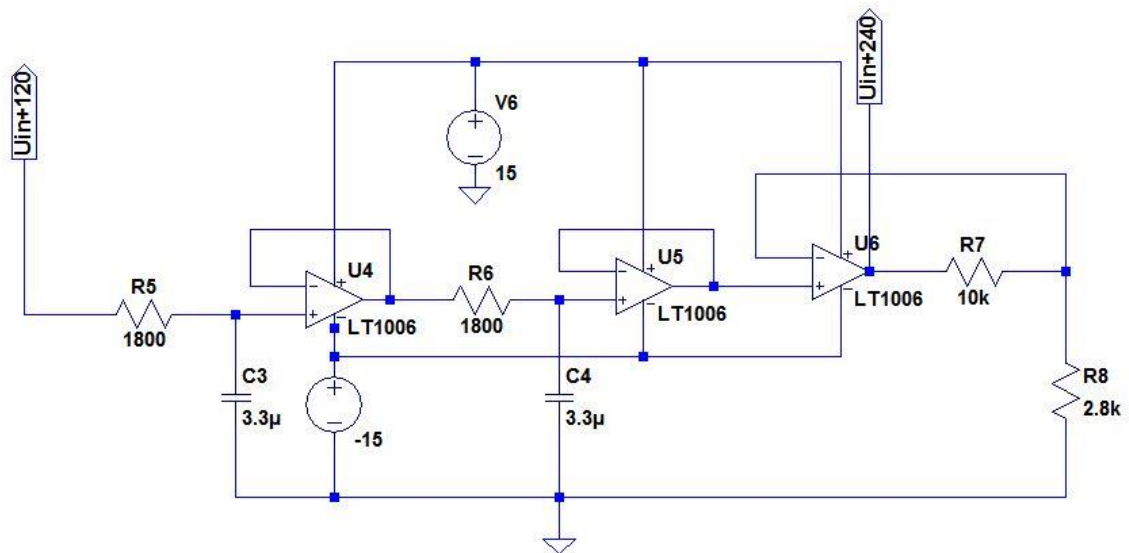


Figura 4.6 Segundo andar - Phase-Shifter

Na Figura 4.7 estão ilustradas as tensões na entrada  $U_{in}$  e nas saídas  $U_{in+120}$  e  $U_{in+240}$ .

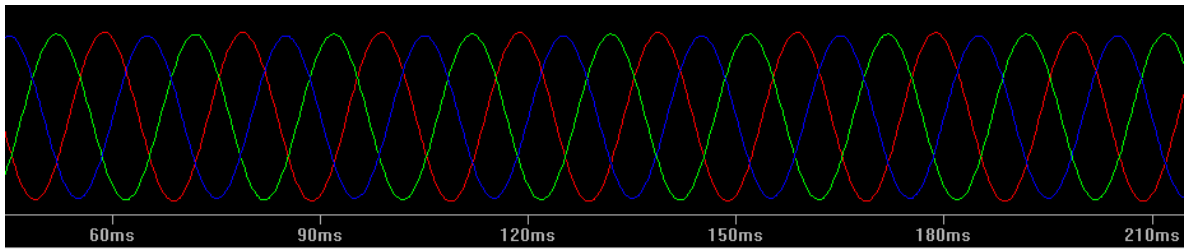


Figura 4.7 Onda de entrada  $U_{in}$  (a verde), e de saída  $U_{in+120}$  (a vermelho) e  $U_{in+240}$  (a azul)

O Phase-Shifter foi dimensionado para produzir um desfasamento de  $120^\circ$  por bloco. No entanto tal processo não seria exequível com um único andar RC. Posto isto dimensionaram-se dois andares que produzem um desfasamento de  $60^\circ$  cada tendo em conta a equação (7).

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$C = 3.3 \mu F \quad R = 1800 \Omega \quad (7)$$

$$\phi = \tan^{-1} 2\pi fRC \Leftrightarrow \phi \approx 61.81^\circ$$

### Implementação

Na Figura 4.8 está ilustrada a implementação do Phase-Shifter e identificação dos respetivos blocos.

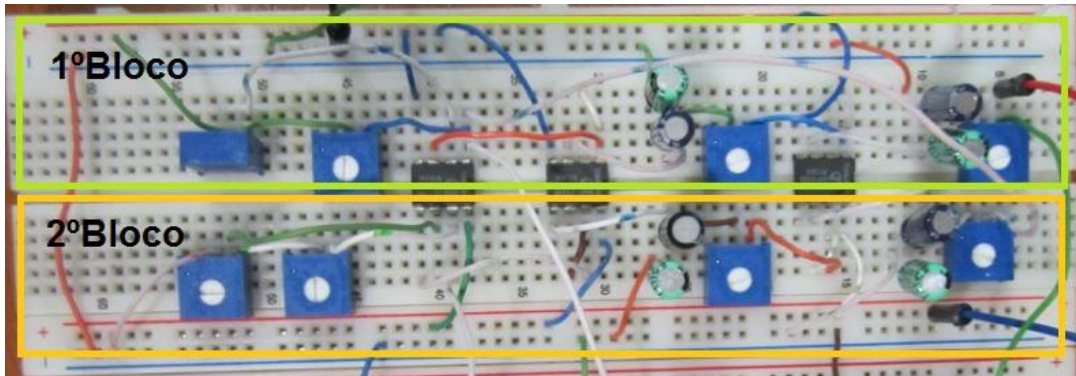


Figura 4.8 Phase-Shifter

Como referido anteriormente no subcapítulo 4.1 a tensão gerada tem 1,5 V AC e uma frequência 50 Hz, o que representa um período  $T$  de 20 ms. De forma a garantir que as três tensões estão desfasadas  $120^\circ$ , o período entre cada tensão deverá ser aproximadamente 6,6 ms. Na Figura 4.9 estão ilustradas as três tensões geradas.



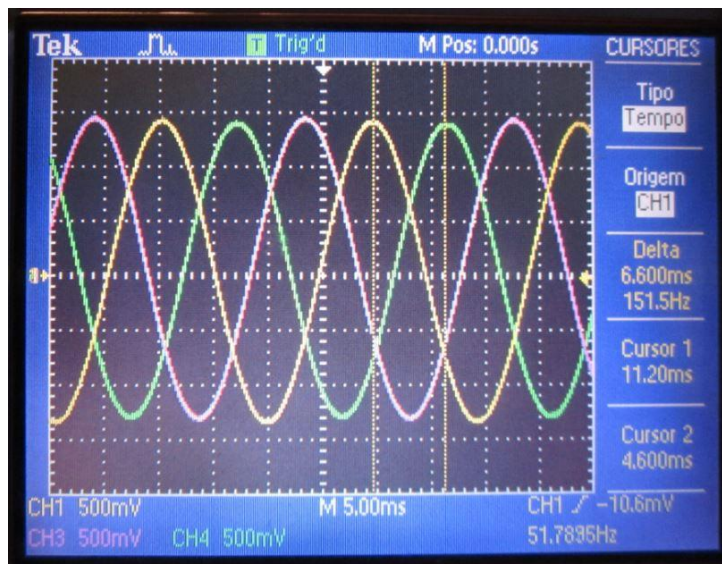


Figura 4.9 Desfasamento entre as três tensões geradas

O correto funcionamento da montagem confirma-se através do desfasamento de 6,6 ms entre cada tensão.

### 4.3 DC Offset

Com a utilização do microcontrolador Arduino surgiu a necessidade de criar um *offset* nas tensões de entrada pois o Arduino não adquire valores negativos de tensão. Posto isto foi necessário deslocar todas as ondas para a parte positiva do eixo das ordenadas. Neste subcapítulo serão demonstrados o dimensionamento e implementação da montagem denominada DC *offset*.

#### Dimensionamento

Para dimensionar a montagem DC *offset* recorreu-se ao circuito ilustrado na Figura 4.10.

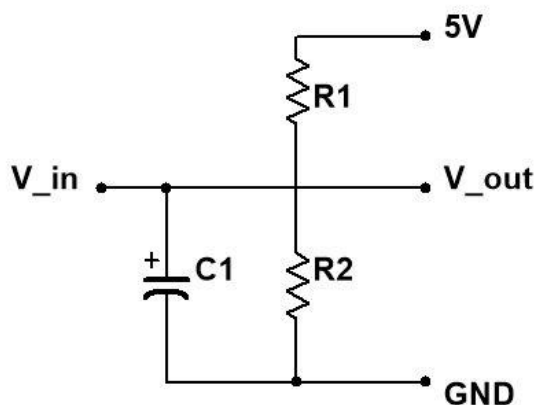


Figura 4.10 Montagem DC Offset

A montagem foi dimensionada segundo a equação (8) para adicionar um *offset* DC.

$$U_{DC\_offset} = 5\text{ V} \cdot \frac{R1}{R1 + R2} \Leftrightarrow U_{DC\_offset} = 5\text{ V} \cdot \frac{330}{330 + 330} = 2,5\text{ V} \quad (8)$$

A tensão gerada na fonte em conjunto com o *offset* adicionado não poderá ultrapassar os valores recomendados para o correto funcionamento do Arduino isto é:

$$U_{arduino} < 5\text{ V}$$

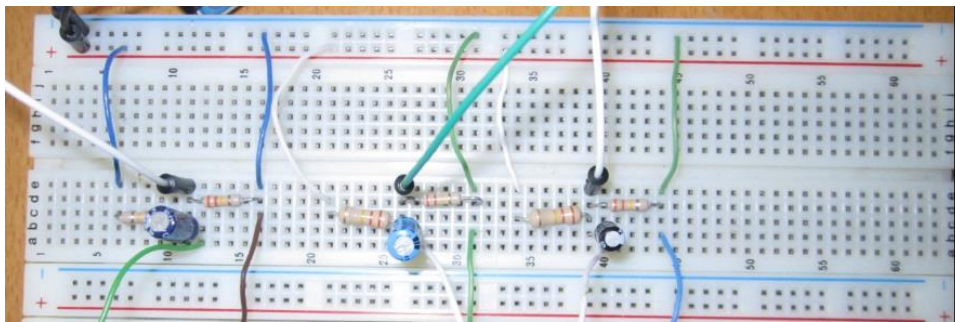
Essa condição foi respeitada como demonstra a equação (9).

$$U_{arduino} = U_{DC\_offset} + U_{abc} \Leftrightarrow U_{arduino} = 2,5\text{ V} + 1,5\text{ V} \quad (9)$$

$$U_{arduino} = 4\text{ V}$$

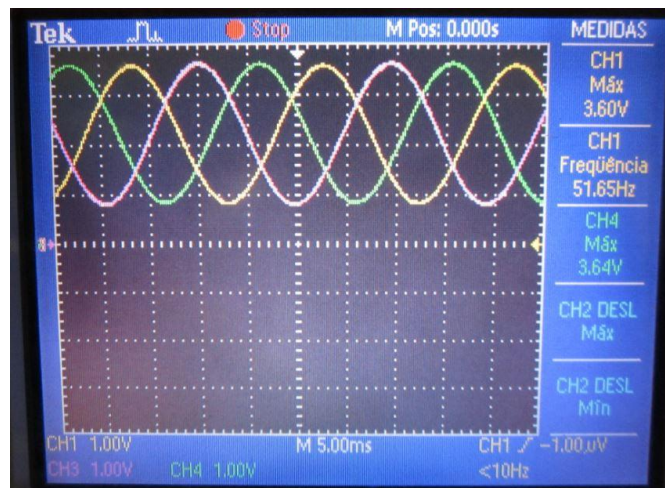
### **Implementação**

Na Figura 4.11 está ilustrada a implementação da montagem DC offset.



**Figura 4.11- Implementação da montagem DC offset**

Na Figura 4.12. estão ilustrados os resultados práticos da implementação da montagem DC *offset*.



**Figura 4.12- Offset adicionado pela montagem**



#### 4.4 Microcontrolador - Arduino

No caso concreto deste sistema, o Arduino UNO foi o microcontrolador escolhido para a implementação do sistema de controlo. O Arduino UNO é um microcontrolador baseado no chip ATmega328P que possui pinos de entrada e saída, alguns dos quais usados como saídas PWM. Este microcontrolador possui um ambiente próprio de desenvolvimento de software o que facilita a escrita e envio de programas para o microcontrolador, a plataforma utilizada chama-se Arduino IDE (Arduino, 2016).



Figura 4.13 - Arduino UNO

O sistema de controlo foi implementado recorrendo a um pequeno programa desenvolvido em linguagem C/C++, que executa sequencialmente os seguintes processos:

- **Leitura e conversão de valores de tensão**

Primeiramente o processo de leitura tem como função adquirir os valores de tensão à entrada dos pinos analógicos do microcontrolador. Esse valor está entre 0 e 5 Volts. No entanto como ADC no Arduino apresenta os valores lidos como um número inteiro entre 0 e 1023, efetuou-se a operação referida na equação (10) para recolocar os valores adquiridos entre 0 e 5 Volts.

$$T1 = \frac{5}{1023} \cdot V_1 \quad (10)$$

Sendo T1 o valor da tensão lida pelo Arduino entre 0 e 5 volts e V\_1 o valor de tensão lido pelo Arduino entre 0 e 1023.

- **Retirar Offset DC**

Devido à incapacidade do Arduino em adquirir tensões negativas, foi introduzido um *offset* DC de 2,5 V nas tensões de entrada como referida em 4.3 que após serem adquiridas, será subtraído através da equação (11):

$$T_a = T_1 - 2,5 \quad (11)$$

Sendo  $T_a$  o valor da tensão de entrada sem offset.

- **Deteção de falha**

Visto que o Arduino adquire três tensões desfasadas de 120 °, garante-se à partida que em funcionamento normal o valor das suas amplitudes nunca são zero simultaneamente.

Posto isto, caso as três tensões sejam zero simultaneamente estar-se-á na presença de uma interrupção total. Nesse caso é iniciada a geração dos sinais PWM que controlarão os IGBTs de forma a fazer chegar a energia ao local pretendido.

- **Gerar PWM**

Os sinais PWM desenvolvidos, baseiam-se no SPWM Unipolar (Anuja Namboodiri, 2014) que consiste em comparar duas ondas sinusoidais de referência com sinais contrários  $U_{ref}$  e  $-U_{ref}$ , com uma onda triangular  $p$  também chamada de portadora. Para tal utilizaram-se as equações (12)(13)(14).

$$U_{ref} = \sin(2\pi ft) \quad (12)$$

$$-U_{ref} = -\sin(2\pi ft) \quad (13)$$

$$p = (2 / \pi) \cdot \text{asin}(\sin(\pi ft)) \quad (14)$$

## 4.5 Driver IR2110

Os sinais de PWM gerados no microcontrolador não podem ser diretamente inseridos nos IGBTs, para tal foi necessário utilizar um integrado que fizesse a ligação entre estes dois itens do sistema. O *driver* IR2110 ilustrado na Figura 4.14 é responsável por fazer a ligação entre o microcontrolador e os IGBTs.



Figura 4.14 - IR2110

A operação do dispositivo de IR2110 é controlada através dos sinais gerados pelo microcontrolador. Esses sinais gerados alimentam os pinos HIN e LIN simultaneamente, estas entradas lógicas que servem para controlar as saídas HO e LO do *driver*. Caso a lógica interna do *driver* detete um valor lógico 1, o pino HO será ativado, caso, seja o valor lógico zero, será ativado o pino de LO. Na Figura 4.15 está ilustrada a montagem utilizada para controlar o conversor meia ponte.

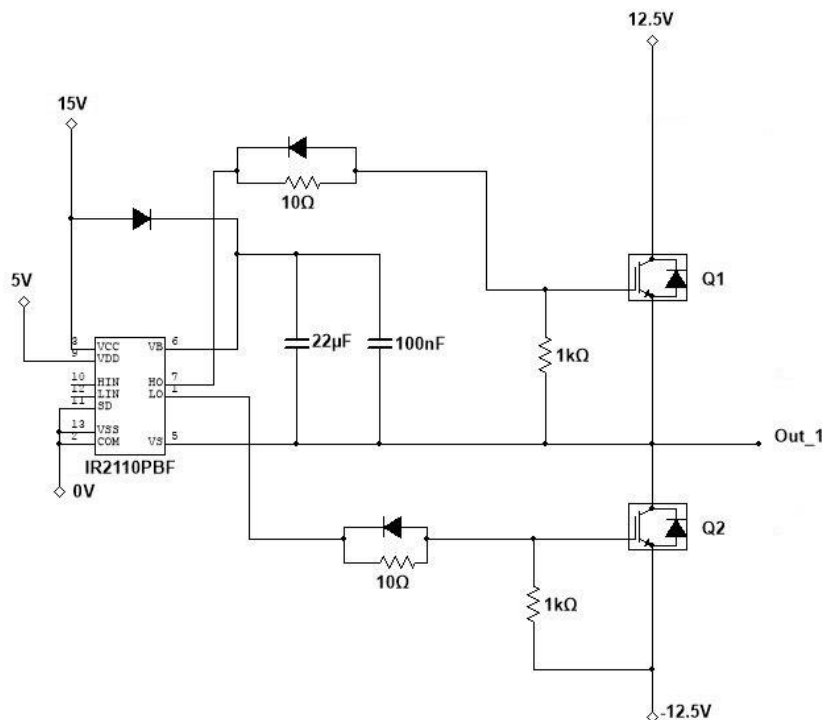


Figura 4.15 - Montagem IR2110 para controlar um conversor meia ponte

Os sinais PWM gerados no microcontrolador e inseridos no *driver* através das entradas HIN e LIN fazem comutar os IGBTs Q1 e Q2. A saída produzida por essa comutação está ilustrada na Figura 4.16 sendo o conversor alimentado com  $V_D = 12,5\text{ V}$  e  $-V_D = -12,5\text{ V}$ .

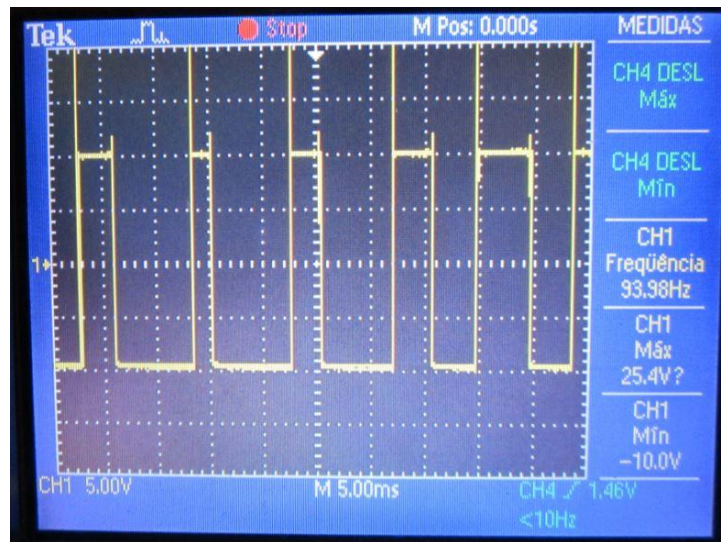


Figura 4.16 - Onda de saída do conversor meia ponte

Pelo facto de a comutação dos IGBTs provocar picos de tensão o valor máximo da onda quadrada apresentada no osciloscópio está em situadada nos 25,4 V, no entanto através de uma breve análise ao mesmo pode-se observar que o valor máximo real se situa 12,5 V aproximadamente pois cada divisão no eixo y corresponde a 5 V.

Na Figura 4.17 está ilustrada a montagem com os *drivers* IR2110 para controlar um conversor ponte completa controlado separadamente, isto é ambos os *drivers* recebem sinais PWM diferentes gerados no microcontrolador.

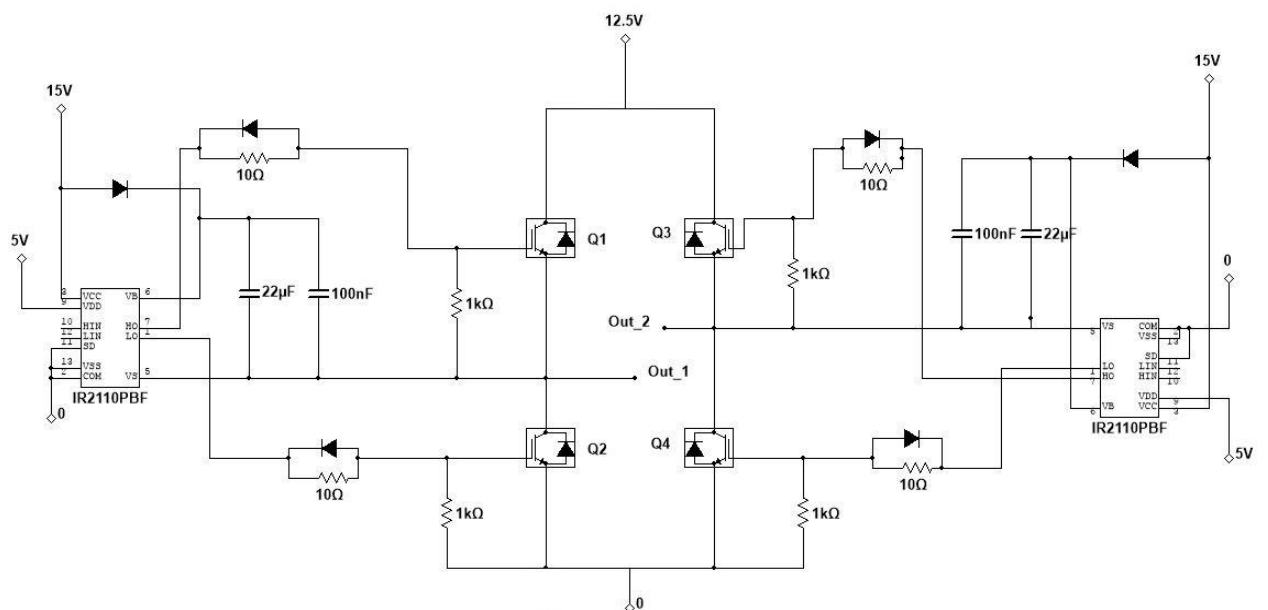


Figura 4.17 Montagem IR2110 para controlar um conversor ponte completa

Neste caso optou-se por alimentar o conversor também com  $V_D = 12,5 \text{ V}$ . Sendo a saída entre os pontos Out\_1 e Out\_2 ilustrada na Figura 4.18.

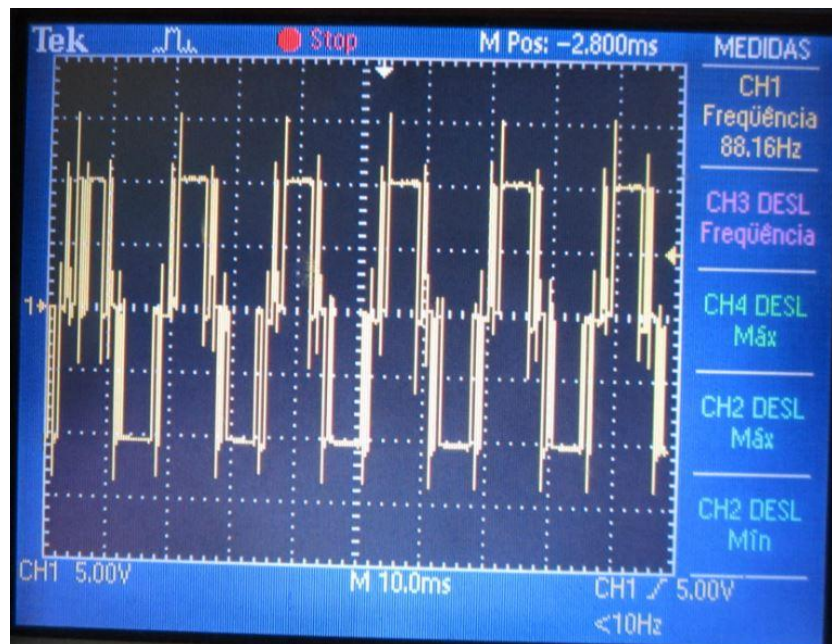


Figura 4.18 - Onda de saída do conversor ponte completa

Analisando a Figura 4.18, pode-se constatar que os sinais PWM oscilam entre 12,5 V e -12,5 V, correspondendo cada divisão no eixo y a 5 V. A ocorrência de alguns picos de tensão está inerente à comutação dos IGBTs, como já foi referido anteriormente. Os quatro IGBTs que constituem o módulo IGBTs utilizado está ilustrado na Figura 4.19.

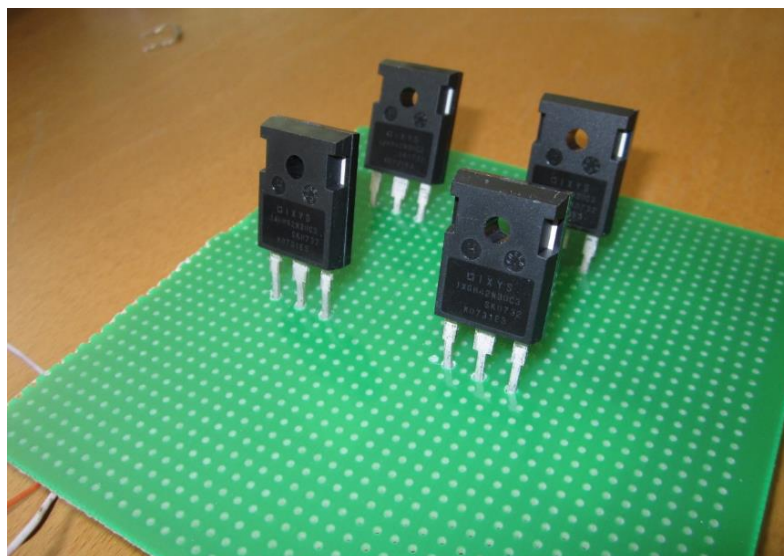


Figura 4.19 – Módulo de IGBT's



## 4.6 Filtro

Os sinais PWM possuem harmônicas de alta frequência que variam consoante a frequência de comutação do inversor. Com o intuito de reduzir esse conteúdo harmônico, optou-se pela aplicação de um filtro RC como ilustrado na Figura 4.20.

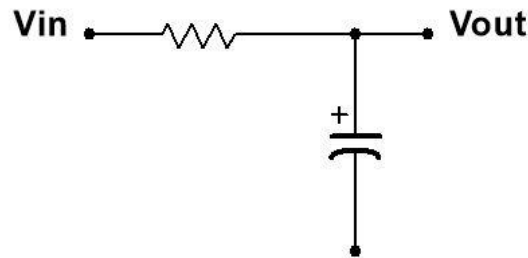
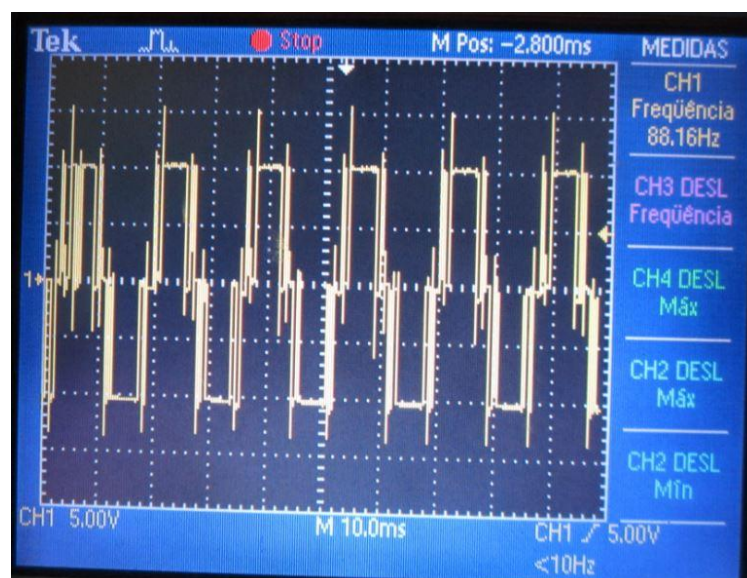


Figura 4.20 - Filtro RC

A frequência de corte  $F_c$  do filtro RC é dada pela equação (15):

$$F_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (15)$$

Substituindo  $R = 140 \, \Omega$  e  $C = 22 \, \mu\text{F}$  em (15) obtém-se  $F_c \approx 51 \, \text{Hz}$ . A Figura 4.21 ilustra os sinais de entrada  $V_{in}$  e de saída  $V_{out}$  do filtro RC.



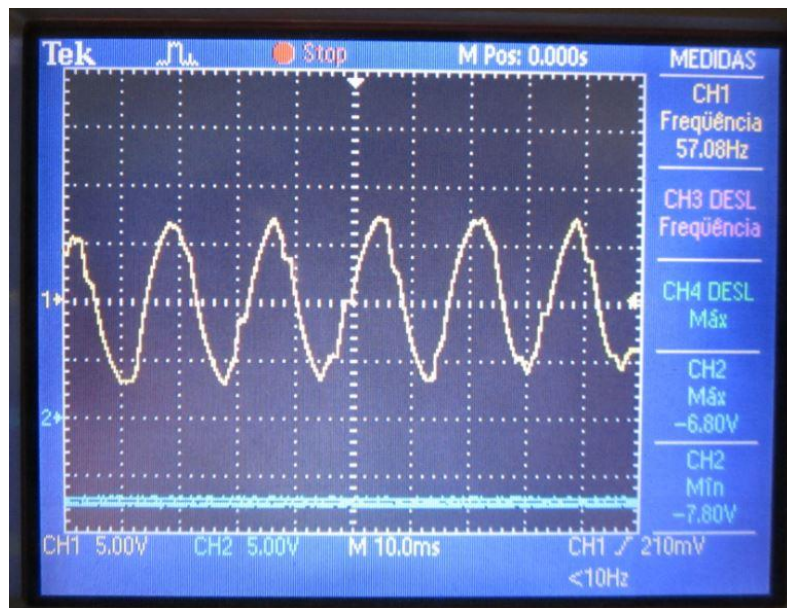


Figura 4.21 - Comparativo entre sinal de entrada ( $U_{in}$ ) sem filtro e de saída ( $U_{out}$ ) com o filtro RC.

Analisando os resultados obtidos através das simulações efetuadas em MatLab/Simulink e os resultados experimentais, no momento em que ocorre falha ilustrados na Figura 4.22 conclui-se que existe uma boa concordância entre os resultados observados.

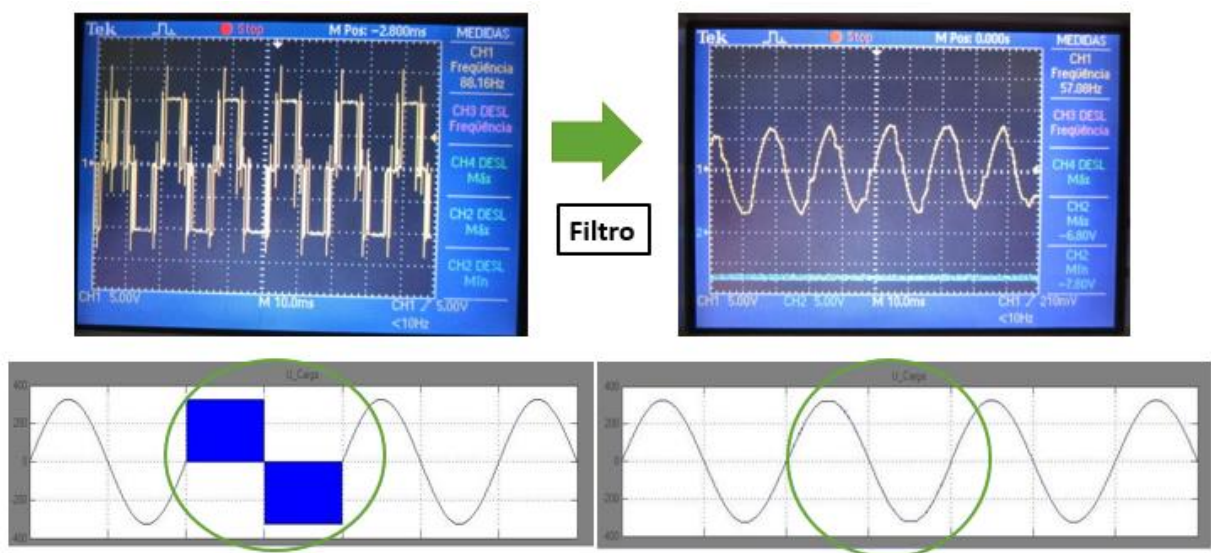


Figura 4.22- Comparativo entre as simulações efetuadas em MatLab/Simulink e os resultados experimentais

## 4.7 Síntese do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados todos os componentes utilizados para o desenvolvimento do controlador do sistema SMES. Na primeira parte dimensionaram-se os componentes Phase-Shifter e DC *offset* utilizados para condicionar as tensões de entrada do controlador.

Na segunda parte descreveu-se o controlador utilizado assim como os processos que nele são efetuados. Apresentou-se o *driver* IR2110 utilizado para conectar os sinais de controlo à saída do controlador aos IGBTs, e por fim dimensionou-se e implementou-se o filtro RC utilizado para filtrar os sinais PWM à saída do conversor AC/DC.





## 5 Conclusões e trabalho futuro

Nesta dissertação apresentou-se um estudo para desenvolver um controlador capaz de detectar interrupções totais na rede. Efetuaram-se simulações de todo o sistema e respectivos constituintes em MatLab/Simulink, tendo em conta o correto funcionamento do sistema e ocorrência de falha.

No entanto implementou-se somente o controlador e as montagens utilizadas como suporte ao mesmo. Essas montagens são imprescindíveis ao funcionamento do sistema pois sem a sua utilização não seria possível adquirir tensões corretamente e por conseguinte não seria possível detectar falhas com o método desenvolvido.

Através de uma análise aos resultados obtidos na implementação do controlador, conclui-se que o controlador cumpre os objetivos estipulados. Existe uma enorme conformidade entre os resultados das simulações realizadas e os resultados práticos, o que leva a concluir que o controlador deteta e funciona de modo a colmatar as interrupções que se fazem sentir na carga, cumprindo assim os requisitos estipulados.

Numa abordagem futura seria aliciante desenvolver todo o sistema SMES, e não só o controlador utilizando um microcontrolador com maior capacidade de processamento, que permita a aplicação da transformada de Park. O microcontrolador Arduino UNO devido às suas limitações, não deixa muita margem de manobra para melhorias.



# Bibliografia

- Alcaria, P. (2012). *Reguladores Ativos de Tensão para a Rede de Distribuição BT (Dissertação de Mestrado)*. Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico.
- Ali, M. H. (2010). An Overview of SMES Applications in Power and Energy Systems.
- Amaro, N., Casimiro, L., Pina, J., Martins, J., & Ceballos, J. (2012). Superconducting Magnetic Energy Storage : A Technological Contribute to Smart Grid Concept Implementation. *Smartgreens - 1st international conference on smart grids an green IT systems*.
- Amaro, N., Casimiro, L., Pina, J., Martins, J., & Ceballos, J. (2015). Combined Operation of an Unified Power Quality. *IFIP International Federation for Information Processing 2015*, 374-382.
- Anuja Namboodiri, H. S. (2014). Unipolar and Bipolar PWM Inverter. *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*.
- Arduino. (1 de Março de 2016). Obtido em 1 de Março de 2016, de Arduino: [www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno](http://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno)
- Blundell, S. (2009). *Superconductivity: A Very Short Introduction*. New York: Oxford University Press.
- Crowhurst, B. E.-S. (2010). Single-Phase Grid-Tie Inverter Control Using DQ transform for active and reactive load power compensation. *PECon2010 - 2010 IEEE International Conference on Power and Energy*, 489-494.
- Delft, D. V., & Kes, P. (2010). The discovery of superconductivity feature. *Physics Today*, 38-42.
- Hassenzahl, W. (1989). Superconducting magnetic energy storage. *IEEE Transactions on Magnetism*.
- Hawley, C. J., & Gower, S. A. (2005). Design and Preliminary Results of a Prototype HTS SMES device. *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, 1899-1902.
- Iglesias, I. J. (1995). Comparative Study and Simulation of Optimal. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 254-257.
- Kim, J. H.-S.-Y. (2005). Characteristic Test of HTS Pancake Coil Modules for. *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, 1919-1922.
- Kreutz, R., Salbert, H., Krischel, D., Hobl, A., Radermacher, C., Blacha, N., ... Dütsch, K. (2003). Design of a 150 kJ high-T<sub>c</sub> SMES (HSMES) for a 20 kVA uninterruptible power supply system. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 1860-1862.
- L. Chen, Y. L. (2006). Detailed Modeling of Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) System. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 699 - 710.

- Mikkonen, R. (2002). Highlights of SC power applications in Europe. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 782-787.
- Molina, M. G. (2011). Power flow stabilization and control of microgrid with wind generation by superconducting magnetic energy storage. *IEEE Transactions on Power Electronics*.
- Namboodiri, A. W. (2014). Unipolar and Bipolar PWM Inverter. *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*.
- Oliveira, J. (2010). *Sistema de Armazenamento de Energia em Bobinas Supercondutoras (Dissertação de Mestrado)*. Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Onnes, H. (1913). Investigations into the properties of substances at low temperatures, which have led, amongst other things, to the preparation of liquid helium. *Nobel Prize Winning*.
- Osterman, F. F. (2006). Preparing teachers to discuss superconductivity at high school level: a didactical approach. *Physics Education*.
- Palma, J. C. (1999). Accionamentos Electromecânicos de Velocidade Variável. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.
- Patel, M. A. (2009). Use of PWM Techniques for Power Quality Improvement. *POSTER PAPER International Journal of Recent Trends in Engineering*, 99-102.
- Pina, J. (2010). *Desenho e Modelização de sistemas de energia empregando materiais supercondutores de alta temperatura (Dissertação de Doutoramento)*. Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Rashid, M. H. (2011). *Power Electronics Handbook*.
- Roshan, A. (2006). *A dq rotating frame controller for single phase full-bridge inverters used in small distributed generation systems*. Blacksburg.
- Seidel, P. (2015). *Applied Superconductivity*.
- Seong, K. C., Kim, H. J., Kim, S. W., Cho, J. W., Kwon, Y. K., Ryu, K. S., . . . Hahn, S. Y. (2002). Current status of SMES in Korea. *Cryogenics*, 351-355.
- Seymour, J. (2005). *The Seven Types of Power Problems (Schneider Electric)*.
- Singh, S. K. (2014). A SURVEY AND STUDY OF DIFFERENT TYPES OF PWM TECHNIQUES USED IN INDUCTION MOTOR DRIVE. *International Journal of Engineering Science & Advanced Technology*, 18-22.
- Skiles, J. J.-P.-S. (1996). Performance of a Power Conversion System (SMES). *IEEE Transactions on Power Systems*.
- Tixador, P. (2008). Transformadores & SMES. *European Summer School on Superconductivity*.

- Tosaka, T., Koyanagi, K., Ohsemochi, K., Takahashi, M., Ishii, Y., & Ono, M. e. (2007). Excitation tests of prototype HTS coil with Bi2212 cables for development of high energy density SMES. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2010-2013.
- UNICAMP, N. /. (2005). Geração Distribuída de Energia Eléctrica. *Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra*.
- Weinstock, H. (1997). *Applications of Superconductivity*.
- Werner Buckel, R. K. (2004). *Superconductivity: Fundamentals and Applications*.
- Xiao, L, W. Z. (2008). Fabrication and Tests of a 1 MJ. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 770-773.
- Xue, X. D. (2006). A study of the status and future of superconducting magnetic energy storage in power systems.
- Yuan, W. (2011). *Second-generation high-temperature superconducting coils and their applications for energy storage ( Doctoral Thesis)*. Cambridge.